

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARAYÜZEYLERİ FARKLI KALINLIKLARDA İMAL EDİLMİŞ
Au/Ti/Al₂O₃/*n*-GaAs/In SCHOTTKY DİYOTLARIN
DİELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN VE AC ELEKTRİKSEL
İLETKENLİKLERİNİN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLILIKLARI**

Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ

**Danışman
Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR**

**DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2018**



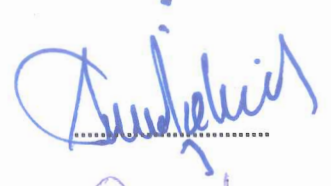
© 2018 [Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ]

TEZ ONAYI

Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ tarafından hazırlanan " Arayüzeyleri Farklı Kalınlıklarda İmal Edilmiş Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In Schottky Diyotların Dielektriksel Özelliklerinin ve ac Elektriksel İletkenliklerinin Frekansa ve Sıcaklığa Bağlılıkları" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

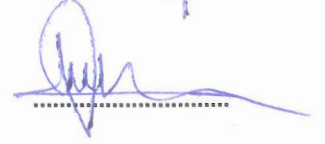
Danışman

Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Ali KÖKCE
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Fethiye GÖDE
Süleyman Demirel Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Gazi Üniversitesi



Jüri Üyesi

Prof. Dr. Abdülmecit TÜRÜT
İstanbul Medeniyet Üniversitesi



Enstitü Müdürü

Prof. Dr. Yasin TUNCER

.....

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
RESİMLER DİZİNİ	xiv
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	13
3. KURAMSAL TEMELLER.....	22
3.1. Metal-Yarıiletken Kontakların Tarihsel Gelişimi	22
3.2 Metal-Yarıiletken Kontaklar	29
3.2.1. Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	31
3.2.2. Metal/ n -tipi yarıiletken ohmik kontaklar	36
3.3. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	38
3.3.1. Termoiyonik emisyon (TE) teorisi	40
3.3.2. Homojen olmayan metal/yarıiletken kontaklarda akım iletimi	43
3.3.3. Difüzyon teorisi.....	46
3.3.4. Termoiyonik emisyon difüzyon (TED) teorisi	47
3.3.5. Tünelleme (Alan emisyonu ve termoiyonik alan emisyonu)	48
3.3.6. T_0 etkili akım iletimi	51
3.4. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojensizlikler	52
3.5. Schottky Diyotlarda İnhomojen Engel Yüksekliği.....	56
3.6. Schottky Engel Diyotların Kapasitansı	58
3.7 Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Kapasitörler	59
3.8. İdeal MIS Kapasitor	60
3.8.1. Yığılma (Accumulation)	63
3.8.2. Tükenim (Depletion).....	63
3.8.3. Tersinim (Inversion).....	64
3.8.4. İdeal MIS kapasitör eğrileri	66
3.9. Schottky Diyotların İdealden Sapma Nedenleri.....	68
3.9.1. İmaj kuvvet (Schottky) etkisi.....	68
3.9.2. Şönt direnci ve seri direnç	70
3.9.3. Tünelleme etkisi.....	73
3.9.4. Kenar etkileri	73
3.9.5. Ara yüzey durumları (N_{ss}).....	74
3.9.6. Tükenim bölgesi jenerasyon-rekombinasyon etkileri	79
3.10 Dielektrik Özellikler	80
3.10.1. Dielektriksiz ve dielektrikli paralel plakalı kondansatör	80
3.10.2. Dielektrik kutuplanma	83
3.10.2.a. Kutuplanma yükleri	84
3.10.2.b. Kutuplanma yüklerinin alanı	85
3.10.3. Kutuplanma mekanizmaları	87
3.10.3.a. Elektronik kutuplanma	88
3.10.3.b. İyonik kutuplanma	90

3.10.3.c. Yönelme kutuplanması	91
3.10.3.d. Ara yüzey-uzay yük kutuplanması	92
3.10.4. Dipol durulma kavramı	94
3.10.5. Dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp ölçüm tekniği.....	97
4. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM.....	100
4.1. GaAs Kristalinin Temel Özellikleri	100
4.2. Arayüzey Yalıtkan Tabaka (Al_2O_3).....	105
4.3. Atomik Katman Depolama/Kaplama Yöntemi(ALD)	107
4.4. Magnetik Alanda DC Saçırma Yöntemi	108
4.5. <i>n</i> -GaAs Kristalinin Temizlenmesi ve Numunelerin Hazırlanması	110
4.6. Yapılan Çalışmalar Esnasında Kullanılan Cihazlar	113
4.7. Deneysel Ölçüm Sistemi	113
4.7.1. Akım-gerilim kaynağı	115
4.7.2. Kapasitans-voltaj ve kondüktans/iletkenlik-voltaj ölçüm sistemi	116
4.7.3. Kriyostat ve sıcaklık kontrol sistemi	117
5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	118
5.1. 30Å Arayüzey Oksit Tabakalı Au/Ti/ Al_2O_3 / <i>n</i> -GaAs (MIS) Tipi Schottky Bariyer Diyodun Sıcaklığa Bağlı Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri.....	121
5.2. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve İletkenlik-Voltaj (G/ω -V) Karakteristikleri.....	137
5.2.1. Farklı arayüzey kalınlıklı numuneler için frekansa bağlı karakteristikler	137
5.2.2. Farklı arayüzey kalınlıklı numuneler için sıcaklığa bağlı karakteristikler	151
5.3. Dielektrik Özellikler.....	165
5.3.1. Farklı arayüzey kalınlıklı numuneler için frekansa bağlı dielektrik özellikler	165
5.3.2. Farklı arayüzey kalınlıklı numuneler için sıcaklığa bağlı dielektrik özellikler	186
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	208
KAYNAKLAR	215
ÖZGEÇMİŞ.....	240

ÖZET

Doktora Tezi

ARAYÜZEYLERİ FARKLI KALINLIKLARDA İMAL EDİLMİŞ Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In SCHOTTKY DİYOTLARIN DİELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN VE AC ELEKTRİKSEL İLETKENLİKLERİNİN FREKANS VE SICAKLIĞA BAĞLILIKLARI

Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

Bu tez çalışmasında, 300 µm kalınlıklı, (100) yüzey yönelimli *n*-GaAs yarıiletken kullanılarak Au/Ti/Al₂O₃/*n*-GaAs Schottky diyotlar imal edilmiştir. Al₂O₃ metal oksit yalıtkan malzeme, ara yüzey tabakası olarak farklı kalınlıklarda atomik katman kaplama (ALD) tekniği kullanılarak büyütülmüştür. Numunenin akım-iletim mekanizmaları (CCMs), (80-380K) sıcaklık aralığında akım-voltaj (I-V) ölçümleri kullanılarak ayrıntılı olarak incelenmiştir. Yarı logaritmik (I-V) eğrileri sırasıyla (0.07-0.30V) ile (0.30-0.69V) aralıklarında Bölge 1 ve 2 (RI-RII) olmak üzere farklı eğimli iki lineer bölgeye sahiptir. İdealite faktörü (*n*) ve sıfır beslem engel yüksekliğinin (Φ_{b0}), sıcaklık ve voltajın güçlü birer fonksiyon olduğu görülmüştür. İki lineer bölge için de sıcaklık artarken *n* azalmakta, Φ_{b0} artmaktadır. Düşük sıcaklıktaki yüksek değerler termoiyonik emisyon (TE) belirgin bir sapmanın işaretidir ve sadece tünelleme mekanizması, yüzey durumları (*N_{ss}*) ve arayüzey tabakasının varlığıyla açıklanamaz. Bu nedenle Φ_{b0} -*q/kT* ile ln(I-V)-*q/kT* grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler (80-170K) ve (200-380K) aralıklarında düşük (LTR) ve yüksek sıcaklık (HTR) aralığı olarak adlandırılan farklı eğimli iki ayrı lineer bölgeye sahiptir. Hazırlanan numunelerdeki bu tarz davranışlar, ortalama bariyer yüksekliği ($\bar{\Phi}_{b0}$) ve standart sapmalara (σ_s) sahip numunelerde çift Gaussian dağılımının (DGD) varlığını doğrulamıştır. (1kHz-1MHz) frekans aralığında oda sıcaklığında ve (80-400K) sıcaklık aralığında 1 MHz' de Au/Ti/Al₂O₃/*n*-GaAs (MIS) yapıların dielektrik özellikleri admittans spektroskopisi yöntemi kullanılarak araştırılmıştır. Dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kaybı (ϵ''), kayıp tanjant (tanδ), *ac* iletkenlik (σ_{ac}), elektrik modülüsün reel (*M'*) ve imajiner (*M''*) kısımları gibi dielektrik parametreler sıcaklığın ve frekansın güçlü birer fonksiyonudur. Deney sonuçları hem kapasitans (C) hem de kondüktans (G/ω) değerlerinin özellikle tükenim ve yığılım bölgelerinde frekans ve sıcaklığın kuvvetli birer fonksiyonu olduğunu doğrulamıştır. Yüksek frekans ($f \geq 1$ MHz) ve düşük sıcaklıklarda ($T \leq 300$ K), (C-V) ve ($\epsilon'-V$) eğrilerinde sırasıyla negatif kapasitans (NC) ve negatif dielektrik sabiti (NDC) davranışları gözlenmiştir. Ek olarak, bu parametrelerin yüzey durumları (*N_{ss}*) ile seri direnç (*R_s*) ve Al₂O₃ tabakasının varlığına bağlı olarak sıcaklık ve gerilimin kuvvetli bir fonksiyonu olduğu

bulunmuştur. NDC fenomeni, (ϵ' -V) eğrilerinden gözlenmektedir. Bu eğrilerin yığılma bölgesindeki kesişme davranışları özellikle düşük sıcaklıkta serbest yükün olmayışına atfedilir. NDC' nin her bir voltaj değerinde artan sıcaklıkla azalışı dielektrik kaybın (ϵ'') artışına karşılık gelir. Bu tür ϵ' davranışları impact ionization yöntemi nedeniyle $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$ arayüzünde bulunan ara yüzey yüklerinin kaybı ile açıklanabilir. Aktivasyon Enerjisi (E_a) değeri çeşitli voltajlar için Arrhenius eğrisinden $\ln(\sigma_{ac})-q/kT$ bulunmuştur ve bu egride her bir gerilim değeri için farklı eğimli iki lineer bölge gözlenmiştir. Bu eğri, uzun ve kısa menzilli sıçrama (hopping) mekanizmalarına bağlı olarak düşük ve yüksek sıcaklıklarda iki farklı iletim mekanizmasının varlığını göstermektedir. Bu parametrelerin tümünün tuzak yüklerinin yeniden yapılanması ve düzenlenmesine bağlı olarak sıcaklığa, ön gerilim voltajına, sıçrama (hopping) mekanizmalarına ve arayüzey tabakasına karşı oldukça duyarlı olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Au/Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3/n$ -GaAs Schottky diyotlar, Atomik katman kaplama (ALD) tekniği, frekans ve sıcaklığa bağlı dielektrik özellikler, Çift Gaussian dağılımı (DGD), Ortalama bariyer yüksekliği, $\bar{\Phi}_{b0}$, Negatif kapasitans (NC) ve Negatif dielektrik sabiti (NDC).

2018, 242 sayfa

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

THE FREQUENCY AND TEMPERATURE DEPENDENCE OF THE DIELECTRIC PROPERTIES AND THE AC ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF THE Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In SCHOTTKY DIODES ARE MANUFACTURED FROM INTERFACES IN DIFFERENT THICKNESS

Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ

Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR

In this thesis, Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs Schottky diodes were fabricated by using n-GaAs substrate semiconductor with 300 µm thickness, (100) surface orientation. Al₂O₃ metal oxide insulator material as an interfacial layer was grown as different thicknesses by using atomic layer deposition (ALD) technique. The current-conduction mechanisms (CCMs) of the sample have been investigated in detail using current-voltage (I-V) measurements in the temperature range of (80-380K). The semi-logarithmic I-V plots have two distinct linear regions with different slopes between (0.07-0.30V) and (0.30-0.69V) which are called Region I and II (RI-RII), respectively. The ideality factor (n) and zero-bias barrier height (Φ_{bo}) were found to be a strong function of temperature and voltage. While the value of n decreases with increasing temperature, Φ_{bo} increases with increasing temperature for two regions. The high value of n at low temperatures is an evident deviation from thermionic emission (TE) and it cannot be also explained only by tunneling mechanism, the existence of surface states (N_{ss}) and interfacial layer. Therefore, the Φ_{bo} vs q/kT plots were drawn for two linear region of $\ln I$ -V plots and they have also two distinct linear region with different slopes between (80-170K) and (200-380K) which are called low and high temperature range (LTR and HTR), respectively. Such behavior of these plots confirmed the existence of double Gaussian distribution (DGD) in prepared samples having mean barrier heights ($\bar{\Phi}_{bo}$) and standard deviation (σ_s). Dielectric properties of (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs (MIS) structures have been investigated by using admittance spectroscopy method within the frequency range of (1kHz-1MHz) at room temperature and temperature range of (80-400K) at 1MHz. Dielectric parameters such as the dielectric constant (ϵ'), dielectric loss (ϵ'') and loss tangent ($\tan\delta$), ac conductivity (σ_{ac}) and real (M') and imaginary (M'') parts of electric modulus

were found a strong function of the temperature and frequency. Also, experimental results confirmed that both capacitance and conductance (G/ω) values were found to be strong functions of frequency and temperature, especially in the depletion and accumulation regions. Negative capacitance (NC) and negative dielectric constant (NDC) behavior were observed in the (C-V) and (ϵ' -V) plots at high frequencies ($f \geq 1\text{MHz}$) and low temperatures ($T \leq 300\text{K}$), respectively. Additionally, these parameters were found to be the strong function of temperature and voltage due to the existence of surface states (N_{ss}), series resistance (R_s) and interfacial sapphire layer. NDC phenomenon has been observed in the ϵ' -V plots and the observation intersection behaviors of these plots at accumulation region can be attributed to the lack of free charge especially at low temperature. The decreases in NDC with increasing temperature for each voltage are corresponding to an increase in the dielectric loss (ϵ''). Such behavior of ϵ' can be explained by the loss of interface charges located at $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaAs}$ interface due to impact ionization process. The activation energy (E_a) value was also found from the Arrhenius plot ($\ln(\sigma_{ac})-q/kT$) for various voltages and observing two distinct linear regions were observed with the different slope for each voltage show that the existence of two different conduction mechanism at low and high temperature due to short and long-range hopping mechanisms. All of these parameters are found to be quite sensitive to the temperature, bias voltage, hopping mechanisms and interfacial layer due to restructuring and reordering of the charges at traps.

Keywords: Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs Schottky diodes, Atomic Layer Deposition (ALD) technique, Double Gaussian distribution (DGD), Mean barrier height $\bar{\Phi}_{bo}$, Frequency and temperature dependent dielectric properties, Negative capacitance (NC) and Negative dielectric constant (NDC).

2018, 242 pages

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca bana güvenerek desteklerini esirgemeyen, karşılaştığım zorlukları aşmamda bilgi birikiminden faydalandığım Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyelerinden başta danışman hocam Prof. Dr. Ahmet Faruk ÖZDEMİR olmak üzere kıymetli hocam Prof. Dr. Ali KÖKCE'ye; hoşgörüsü, sabrı, tecrübesi ve bilgi paylaşımındaki cömertliğiyle bilge hocam Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL' a sonsuz teşekkür ve şükranlarımı sunarım.

Bu tezin numune fabrikasyonu Bilkent Üniversitesi Uluslararası Nanoteknoloji Araştırma Merkezi' nde (UNAM), elektriksel analizi ise Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi (STARLAB) Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Özellikle bu imkânlardan faydalanabilme olanağı sağlayan üniversitelerin ilgili birimlerinin yöneticilerine teşekkürlerimi sunarım.

4429-D2-15 No'lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Çalışma sürecimde ihtiyaç duyduğum her an bilgi paylaşımı ve manevi destekleriyle beni yüreklendiren başta Süleyman Demirel Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü olmak üzere değerli hocam Dr. Durmuş Ali ALDEMİR, can arkadaşım Doç. Dr. Sennur ALAY AKSOY ile meslektaşlarım Havva Elif LAPA ve Yılmaz KANSIZ'a da teşekkürü bir borç bilirim.

Son söz..Her daim beni destekleyen aileme sonsuz minnet, sevgi ve şükranlarımla..

Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ
ISPARTA, 2018

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Metal/ n -tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji-bant diyagramları.....	33
Şekil 3.2. Metal/ n -tipi yarıiletken ohmik kontağın enerji-bant diyagramları.....	37
Şekil 3.3. Metal/ n -tipi GaAs yarıiletken pozitif voltaj uygulandığında temel akım iletim mekanizmaları	40
Şekil 3.4. a) AE ve b) TAE mekanizmalarının oluşumu	49
Şekil 3.5. Schottky engel diyotlarda a) doğru ve b) ters beslemlerde TAE ve AE mekanizmaları	50
Şekil 3.6. Voltaja bağlı farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren (nkT/q) - (kT/q) eğrisi	52
Şekil 3.7. Metal/yarıiletken arayüzeyinde homojen olmayan engel modeline göre şematik enerji diyagramı	53
Şekil 3.8. Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip bir Schottky engel diyodunun V gerilimi altındaki iki boyutlu bant diyagramı	54
Şekil 3.9. Bir metal/yarıiletken doğrultucu kontak için örnek potansiyel engelinin bilgisayar simülasyonu ile elde edilen üç boyutlu yanal inhomojenliğinin görüntüsü.....	54
Şekil 3.10. Bir metal/yarıiletken doğrultucu kontakta kısılma durumunu gösteren enerji-bant diyagramı	57
Şekil 3.11. Bir metal/ n -tipi yarıiletken Schottky bariyer diyodun voltaja bağlı enerji-bant diyagramı	58
Şekil 3.12. MIS yapının şematik gösterimi.....	59
Şekil 3.13. MIS tipi kapasitörün basit gösterimi.....	60
Şekil 3.14. $V=0'$ da dengedeki ideal MIS kapasitörün enerji-bant diyagramı (n -tipi yarıiletken)	61
Şekil 3.15. MIS kapasitansının eşdeğer devresi.....	62
Şekil 3.16. $V \neq 0$ durumunda (a) Yığılma, (b) Tükenim ve (c) Tersinim şartları için farklı beslemler altında ideal MIS kapasitörlerin enerji-bant diyagramları	65
Şekil 3.17. İdeal MIS kapasitörün, güçlü tersinim altında yarıiletken gövdeye bağlı (a) bant diyagramı, (b) yük dağılımı, (c) elektrik alan dağılımı, (d) potansiyel dağılımı	66
Şekil. 3.18. a) İmaj yükü b) Sabit bir elektrik alanda hayali kuvvetten dolayı potansiyel engelindeki bükülme (Schottky engelinin imaj yükü alçalması)	69
Şekil 3.19. Schottky eşdeğer devresi.....	70
Şekil 3.20. Metal/yarıiletken kontaklarda seri direnç etkisi	72
Şekil 3.21. Metal/yarıiletken kontaklarda kenar etkisi	74
Şekil 3.22. İdeal olmayan SiO_2 ara yüzey tabakalı bir MIS yapıda ara yüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması	75
Şekil 3.23. MIS yapısının eşdeğer devresi a) bir enerji seviyesi için b) birbirinden farklı enerji seviyeleri için	77
Şekil 3.24. Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör	81
Şekil 3.25. Dielektrikli paralel plakalı kondansatör	82
Şekil 3.26. Dış elektrik alan etkisi altındaki dipollerin yönelimleri	84

Şekil 3.27. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu.....	85
Şekil 3.28. Dielektrik kutuplanma mekanizmalarının frekans aralığına bağlı değişimi	88
Şekil 3.29. Elektronik kutuplanma	89
Şekil 3.30. İyonik kutuplanma	90
Şekil 3.31. NaCl kristalinde kutuplanma gösterimi (a) dış elektrik alan uygulanmadığında (b) dış elektrik alan uygulandığında	91
Şekil 3.32. Yönelme kutuplanması	92
Şekil 3.33. Ara yüzey yük kutuplanması	93
Şekil 3.34. Dielektrik sabitinin gerçek (ϵ') ve sanal (ϵ'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi	96
Şekil 3.35. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_C) ile kayıp akım (I_L) arasındaki ilişki	99
Şekil 4.1. GaAs için enerji-bant diyagramı	100
Şekil 4.2. GaAs kristal yapısı.....	101
Şekil 4.3. Si ve GaAs için enerji-bant yapıları.....	102
Şekil 4.4. Elektrik alanın fonksiyonu olarak Si ve GaAs için taşıyıcı hızlarının değişimi	103
Şekil 4.5. Manyetik alanda DC saçırma sisteminin şeması	109
Şekil 4.6. (a) ohmik kontak (b) doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler.....	112
Şekil 4.7. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs/In MIS tipi Schottky bariyer diyodun şematik gösterimi	113
Şekil 4.8. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi	114
Şekil 5.1. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun çeşitli sıcaklıklarda semi-logaritmik doğru beslem I-V karakteristikleri.....	122
Şekil 5.2. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun sıcaklığa bağlı doğru beslem n ve Φ_{b0} karakteristikleri (a) RI ve (b) RII için.....	126
Şekil 5.3. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII için $n - 1000/T$ grafikleri	128
Şekil 5.4. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun RI için $nkT/q - kT/q$ grafikleri	129
Şekil 5.5. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII için deneysel $\Phi_{b0} - n$ grafikleri	130
Şekil 5.6. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII için deneysel $\Phi_{b0} - q/2kT$ grafikleri	131
Şekil 5.7. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII için $(n^{-1} - 1) - q/2kT$ grafikleri.	133
Şekil 5.8. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII bölgeleri için bariyer yüksekliğinin Gaussian dağılımına göre Modifiye Richardson ($\ln(I_s / T^2) - q^2 \sigma_s^2 / 2k^2 T^2$ ile q/kT) grafikleri.....	135
Şekil 5.9. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki a) C-V, b) G/ ω -V karakteristikleri	139

Şekil 5.10. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki a) C-V, b) G/ω-V karakteristikleri	141
Şekil 5.11. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki a) C-V, b) G/ω-V karakteristikleri	143
Şekil 5.12. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki R _s -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	146
Şekil 5.13. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky oda sıcaklığında bariyer diyodun çeşitli frekans ölçümlerindeki R _s -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	147
Şekil 5.14. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki R _s -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	148
Şekil 5.15. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) C-V, b) G/ω-V karakteristikleri	152
Şekil 5.16. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de sırasıyla a) 200K, b) 300K, c) 380K' de C-V ve G/ω-V karakteristiklerinin karşılaştırılması	154
Şekil 5.17. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli doğru beslem voltajlarında sıcaklığa bağlı (a) C ve (b) G/ω değerleri	156
Şekil 5.18. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) C-I b) G/ω-I karakteristikleri	157
Şekil 5.19. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) C-V (sırasıyla (±7) ve (±2) voltaj aralıkları için ayrı ayrı çizilmiştir.), b) G/ω-V karakteristikleri	159
Şekil 5.20. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) C-V (iki beslem bölgesine ayrılarak gösterilmiştir.), b) G/ω-V karakteristikleri	160
Şekil 5.21. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) R _s -V ve b) 0.5V adımlarla çeşitli doğru beslem voltajlarında R _s -T karakteristikleri	161
Şekil 5.22. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1MHz' de N _{ss} ara yüzey yoğunluğunun sıcaklığa bağlı dağılımı	162
Şekil 5.23. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda R _s -V karakteristikleri	164

Şekil 5.24. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda R_s -V karakteristikleri	164
Şekil 5.25. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki ϵ' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	167
Şekil 5.26. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki ϵ'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	168
Şekil 5.27. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki tan δ -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	170
Şekil 5.28. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki M' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için.....	171
Şekil 5.29. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki M'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için.....	172
Şekil 5.30. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki σ_{ac} -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için.....	174
Şekil 5.31. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki ϵ' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	175
Şekil 5.32. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki ϵ'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	176
Şekil 5.33. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki tan δ -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	177
Şekil 5.34. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki M' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	178
Şekil 5.35. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki M'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için.....	179

Şekil 5.36. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki σ_{ac} -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için.....	180
Şekil 5.37. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki ϵ' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	181
Şekil 5.38. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki ϵ'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	182
Şekil 5.39. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki tan δ -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için.....	183
Şekil 5.40. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki M' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için	184
Şekil 5.41. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki M'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için.....	185
Şekil 5.42. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekanslardaki σ_{ac} -V karakteristikleri	186
Şekil 5.43. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) ϵ' -V ve b) ϵ'' -V karakteristikleri	187
Şekil 5.44. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda tan δ -V karakteristikleri.....	188
Şekil 5.45. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) M' -V, b) M'' -V karakteristikleri	188
Şekil 5.46. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda σ_{ac} -V karakteristikleri.....	189
Şekil 5.47. 30Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli doğru beslem voltajlarında sırasıyla a) ϵ' -T, b) ϵ'' -T, c) tan δ -T, d) M' -T, e) M'' -T ve f) σ_{ac} -T karakteristikleri	191
Şekil 5.48. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) ϵ' -V, b) ϵ'' -V karakteristikleri	192
Şekil 5.49. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda tan δ -V karakteristikleri.....	192

Şekil 5.50. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) M' -V, b) M'' -V karakteristikleri	193
Şekil 5.51. 50Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda σ_{ac} -V karakteristikleri.....	194
Şekil 5.52. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) ϵ' -V ve b) ϵ'' -V karakteristikleri	196
Şekil 5.53. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de sırasıyla (a) 80K, (b) 170K, (c) 280K' de ϵ' -V ve ϵ'' -V karakteristiklerinin karşılaştırılması	197
Şekil 5.54. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) (-6.5V-1.5V) voltaj aralığındaki, b) (1.5V-6.5V) voltaj aralığındaki $\tan\delta$ -V karakteristikleri	199
Şekil 5.55. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) M' -V, b) M'' -V karakteristikleri	201
Şekil 5.56. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda σ_{ac} -V karakteristikleri.....	202
Şekil 5.57. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli doğru beslem voltajlarında sırasıyla a) ϵ' -T, b) ϵ'' -T, c) $\tan\delta$ -T, d) M' -T, e) M'' -T ve f) σ_{ac} -T karakteristikleri	204
Şekil 5.58. 100Å Al ₂ O ₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun düşük ve orta sıcaklık aralığında ac elektriksel iletkenliğinin $\ln(\sigma_{ac})-(q/kT)$ Arrhenius eğrileri.....	206

RESİMLER DİZİNİ

Resim 4.1. Savannah 100 Atomik katman kaplama ünitesi	108
Resim 4.2. Manyetik alan DC-RF Saçtırma Ünitesi	110
Resim 4.3. Yüksek vakum pompalı kaplama ünitesi.....	111
Resim 4.4. Hızlı termal tavlama ünitesi (Rapid Termal Annealing-RTA)	111
Resim 4.5. a) (5Hz-13Hz) aralığında ölçüm yapabilen Hewlett Packard (HP) 4192A LF empedans analizörü (Impedance Analyzer), b) ($\pm 10\text{pA}$, $\pm 1\text{ A}$) aralığında ölçüm yapabilen Keithley 2400 akım-gerilim (I-V) kaynağı (SourceMeter), c) Janis VPF475 sıvı azotlu kriyostat sistemi (Liquid Nitrogen Cryostat) ve d) Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi (Autotuning Temperature Controller)	115
Resim 4.6. Keithley 2400 akım-gerilim (I-V) ölçüm kaynağı.....	116
Resim 4.7. Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü	116
Resim 4.8. Janis VPF475 kriyostat	117
Resim 4.9. Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol cihazı.....	117

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 3.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve ohmik kontakların oluşumu	31
Çizelge 4.1. GaAs' ın bazı temel özellikleri	104
Çizelge 5.1. Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen sıcaklığa bağlı I_s , n , Φ_{bo} ve nT değerleri	124
Çizelge 5.2. 100Å Al ₂ O ₃ arayüzey kalınlıklı Au/Ti/Al ₂ O ₃ /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun ($\ln(\sigma_{ac}) - q/kT$) karakteristiklerinden elde edilen voltaja bağlı σ_0 ve E_a değerleri.....	206

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Diyodun etkin alanı
Å	Angstrom
A^*	Etkin Richardson sabiti
Au	Altın
Al	Aluminyum
As	Arsenayt
Ar	Argon
Al_2O_3	Aluminyum Oksit/safir
B	Bor
BTO	Baryum titanat
$^{\circ}C$	Santigrad derece/Celcius cinsinden sıcaklık
C	Karbon
C	Kapasitans/sığa
C_D	Tükenim kapasitansı
C_i	Yalıtkan kapasitansı
Co	Kobalt
C_0	Boş kondansatörün sığası
C_{ox}	Yalıtkan tabakanın sığası
d_{ox}/d_i	Oksit/Yalıtkan tabakanın kalınlığı
ϵ_{ox}	Yalıtkan tabakanın sığası
CdS	Kadmiyum sülfür
C_{ex}	İlave/excess yük kapasitansı
C_{sc}	Uzay yük kapasitansı
C_{ss}	Arayüzey kapasitansı
C_{it}	Arayüzey hallerinin kapasitansı
C_m	Ölçülen kapasitans değeri
Cr	Krom
D	Elektrik yerdeğiştirme vektörü
D_n	Elektron difüzyon sabiti
D_p	Yarıiletken bölgedeki deşiklerin difüzyon sabiti
D_{it}	Arayüzey hallerinin yoğunluğu
e	elektronun yükü
E	Elektrik alan
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_{max}	Yarıiletken içerisindeki elektrik alanın en yüksek değeri
$E_{(x)}$	Tükenim bölgesindeki elektrik alan
E_{it}	Arayüzey hallerinin enerjisi
E_V	Değerlik/valans bant kenarı enerjisi
E_C	İletkenlik bant kenarı enerjisi
E_F	Fermi enerji seviyesi
E_s	Yarıiletkenin dolu bandının vakum seviyesi altındaki derinliği
E_{fm}	Metalin fermi enerji seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
E_g	Yarıiletken yasak enerji aralığı
E_i	Saf/intrinsic durumdaki enerji seviyesi
E_{fn}	Quasi fermi seviyesi
E_0	Tünelleme katsayısı

E_{00}	Tünelleme olasılığını temsil eden karakteristik enerji
eV	Elektron volt
Ga	Galyum
Ge	Germenyum
G_m/ω	Ölçülen iletkenlik değeri
GaN	Galyum nitrit
f	frekans
H	Hidrojen
HfO ₂	Hafniyum dioksit
h	Planck sabiti
ϵ_0	Boşluğun elektrik geçirgenliği
ϵ_i	Arayüzey tabakanın dielektrik sabiti
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ^*	Kompleks dielektrik sabiti
ϵ'	Dielektrik sabiti
ϵ''	Dielektrik kayıp
γ	Küçük lokal bölge fonksiyonuyla ilgili sabit
Hz	Hertz (Frekans birimi)
K	Potasyum
⁰ K	Kelvin cinsinden sıcaklık
k	Boltzmann sabiti
L	Nötral bölge kalınlığı
L_p	Deşik difüzyon uzunluğu
Li	Lityum
L_D	Debye uzunluğu
m_0	Serbest elektron kütlesi
m_e^*	Elektronların etkin kütlesi
m_h^*	Hollerin/deşiklerin etkin kütlesi
M^*	Kompleks elektrik modülü
M'	Elektrik modülüsün reel kısmı
M''	Elektrik modülüsün sanal/imaginer kısmı
Mo	Molibden
MgB ₂	Magnezyum diboride
N	Azot
N(x)	Herhangi bir x noktasındaki taşıyıcı yoğunluğu
N_A	Alıcı/akseptör katkı atomlarının yoğunluğu
N_A'	Deneyisel katkılanan alıcı/akseptör atomlarının yoğunluğu
N_D	Verici/donor katkı atomlarının yoğunluğu
N_D'	Deneyisel katkılanan verici/donor atomlarının yoğunluğu
N_C	İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu
N_V	Değerlik/valans bandındaki durumların yoğunluğu
N_{ss}	Arayüzey durum yoğunluğu
Ni	Nikel
n_{p0}	Elektronların yarıiletken içindeki denge yoğunlukları
p_{p0}	Boşlukların yarıiletken içindeki denge yoğunlukları
n_{ap}	Görünen idealite faktörü
nm	nanometre
N(E)	Bantlardaki durumların yoğunluğu
n(x)	Elektron yoğunluğu

$n\text{-GaAs}$	n tipi Galyum Arsenayt
O	Oksijen
Q	Yük yoğunluğu
Q_s	Uzay yük yoğunluğu
Q_{it}	Arayüzey tabakası yük yoğunluğu
Q_{sc}	Uzay yükü bölgesi yük yoğunluğu
Q_{ox}	Oksit yük yoğunluğu
P	Fosfor
$\vec{P}$	Elektrik dipol momenti
PVA	Poly vinyl alcohol
PVC	Poly vinyl chloride
Pd_2Si	Paladyum silisit
Si	Silisyum
SiO_2	Silisyum dioksit
In	İndiyum
InP	İndiyum fosfat
Ti	Titanyum
TCNQ	Tetracyanoquinodimethane
TiW	Titanyum tungsten
t	Zaman
T	Mutlak sıcaklık
TiO_2	Titanyum dioksit
$\tan\delta$	kayıp açısı/dielektrik tanjant
q	elektrik yükü
R_0	Küçük lokal bölgenin yarıçapı
R_i	Direnç
R_s	Seri direnç
R_{ss}	Arayüzey direnci
R_{sh}	Kısa devre direnci
Sb	Antimon
SnO_2	Kalay dioksit
SiO_2	Silisyum dioksit
Si_3N_4	Silisyum nitrür
$U(x)$	Potansiyel enerji
V	Kontağa uygulana gerilim
V_i	Kontak potansiyel farkı/Arayüzey tabakasına düşen gerilim
V_p	Yarıiletkenin valans bandının tepesiyle Fermi seviyesi arasındaki fark
V_s	Tükenim(deplasyon) bölgesine düşen gerilim
V_0	C ⁻² -V eğrisinin V eksenini kestiği nokta
V_D	Diyot üzerine düşen gerilim
V_d	Difüzyon potansiyeli
V_{dif}	Difüzyon potansiyeli
V_F	Kontağa uygulanan doğru beslem (forward bias) gerilimi
V_R	Kontağa uygulanan ters beslem (reverse bias) gerilimi
V_G	Doğrultucu metal kontağa uygulanan gerilim/Geçit voltajı
V_r	Termoiyonik rekombinasyon hızı
V_{bi}	Kontak potansiyel farkı (built in potential)
$f(E)$	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
W_D	Tükenim tabakasının (uzay yükü bölgesinin) genişliği

ZnO	Çinko oksit
Φ_0	Nötral seviye
Φ_b	Potansiyel engel yüksekliği
Φ_{b0}	Sıfır voltaj potansiyel engel yüksekliği
Φ_b^0	Homojen engel yüksekliği
Φ_b^I	Hayali/İmaj kuvvet etkisi göz önüne alınarak bulunan engel yüksekliği
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_{eff}	Etkin engel yüksekliği
$\Phi_{b,patch}$	Küçük lokal bölge engel yüksekliği
$\bar{\Phi}_b$	Ortalama engel yüksekliği
$\bar{\Phi}_{b0}$	Sıfır beslem ortalama engel yüksekliği
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
$\Delta\Phi_b$	Engel düşmesi
$\Delta\Phi_{bi}$	İmaj/hayali yükün sebep olduğu engel yüksekliği alçalması
$\Delta(0)$	Sıfır beslem altında arayüzey tabakasındaki gerilim düşüşü
$\Delta(V)$	Bir beslem altında arayüzey tabakasındaki gerilim düşüşü
Φ_{ap}	Görünen engel yüksekliği
Φ_n	n -tipi yarıiletkenin E_c ile E_F arasındaki enerji farkı
Ψ	Potansiyel fonksiyonu
Ψ_B	n -tipi yarıiletkenin E_c ile E_F arasındaki enerji farkı
Ψ_s	Yarıiletkenin yüzey potansiyeli
I	Diyottan geçen akım
I_0/I_s	Doyma/saturasyon(saturation) akımı
J_0	Doyma/saturation akım yoğunluğu
J_g	Jenerasyon akımı
I_{rg}	Tükenim bölgesinde rekombinasyon akımı
J_{sT}	Ters beslem doyma akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale doğru akım yoğunluğu
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene doğru akım yoğunluğu
δ	Arayüzey yalıtkan tabaka kalınlığı
Ω	Ohm
ρ	Özdirenc
σ_s	Standart sapma
τ	Zaman sabiti/Arayüzey tuzaklarının ömrü
χ	Etkin tünelleme faktörü
χ_s	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
n	İdealite faktörü
n_i	Asal/intrinsic elektron konsantrasyonu/yoğunluğu
p_i	Asal/intrinsic hol/deşik konsantrasyonu/yoğunluğu
p_n	Hol/deşik konsantrasyonu/yoğunluğu
ρ_2 ve ρ_3	Engel yüksekliği dağılımının voltaja bağlı deformasyon katsayıları
σ_0	Standart sapma
ω	Açısal hız
v	Çizgisel hız
μ	Mobilite
μ_p	Hol mobilitesi
μ_n	Elektron mobilitesi

μm	Mikrometre
Y	Admittans
Z	Empedans
Zn	Çinko
ZnSe	Çinko selenid
<i>ac</i>	Alternatif akım
AFM	Atomik kuvvet/force mikroskobu
ALD	Atomik katman kaplama (Atomic Layer Deposition)
AE/FE	Alan/field emisyonu
AETs/FETs	Alan/field etkili transistörler
CVD	Kimyasal buhar biriktirme/Chemical vapour deposition
C-V	Kapasitans-voltaj
<i>dc</i>	Doğru akım
DGD	Double Gaussian dağılımı
DT	Difüzyon teorisi
<i>FE</i>	Alan emisyonu
GD	Gaussian dağılımı
G/ ω -V	Kondüktans/iletkenlik-voltaj
HBTs	Heteroyapılı bipolar transistörler
HEMT	Yüksek elektron mobiliteli transistör
I-V	Akım-voltaj
LED	Işık yayan diyot
MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MPS	Metal-Polimer-Yarıiletken
MEMS	Mikro elektronik mekanik sistem
MFS	Metal-Ferroelektrik-Yarıiletken
MESFET	Alan etkili metal yarıiletken transistör
MOSFET	Alan etkili metal oksit yarıiletken transistör
NC	Negatif kapasitans (capacitance)
OLED	Organik Işık yayan diyot
PVD	Fiziksel buhar biriktirme/Physical vapour deposition
PE	Potansiyel enerji
PPy	Polypyrrole
RR	Doğrultma Oranı/Rectifier ratio
RF	Radyo frekansı
RTA	Hızlı termal tavlama /Rapid Thermal Annealing
SBD	Schottky engel/bariyer diyodu
SRH	Shockley Read Hall
TE	Termoionik emisyon
TED	Termoionik Emisyon-Difüzyon teorisi
TAE/TFE	Termoionik alan (field) emisyonu

1. GİRİŞ

Katıların elektriksel iletkenliğinde en önemli hususlardan biri iletkenlik aralığının son derece geniş oluşudur. Bakır (Cu) ve gümüş (Ag) gibi en iyi iletkenle, kükürt (S) gibi en iyi yalıtkan arasında iletkenlik oranı 10^{24} mertebesinde daha büyüktür. Bu durum bir gezegenin yörünge çapı ile atom etrafında dönen elektronun yörünge çapının kıyaslanmasına benzetilebilir. Elektriksel iletkenliğin bu büyük oranı, malzemelerde bulunan bağlar göz önünde bulundurularak açıklanabilir. Metalik bağlar serbest elektron üretir ve bu elektronlar da elektrik alan etkisiyle kolayca hareket edebilir. Dolayısıyla bu malzemeler iletkenleri teşkil ederler. Diğer bağ tiplerinde valans elektronları belli atomlara, iyonlara veya kovalent bağda olduğu gibi atom çiftlerine sıkıca bağlı ise bu malzemeler de yalıtkan olarak adlandırılırlar. Bu model iletken ve yalıtkan gibi iki zıt davranışı izah ederken bu iki uç arasında iletkenliğin neden süreklilik gösterdiğini izah edememektedir. Basit bağlanma modeli ile açıklanamayan diğer bir özellik ise aynı tip bağlara sahip birçok malzemenin farklı elektriksel özellik göstermesidir. Örneğin silisyum ve elmasın her ikisi de benzer kristal yapıda ve kovalent bağlara sahip olmalarına rağmen, bilhassa yüksek sıcaklıklarda silisyum makul ölçülerde iyi bir iletken olabiliyorken elmas çok iyi bir yalıtandır (Turton, 1998). İşte burada silisyum (Si) gibi yarıiletkenler, iletkenlikleri metallerle yalıtkanlar arasında olan malzemelerdir. Yarıiletkenler genel olarak iki grupta sınıflandırılabilir; bunlardan ilki periyodik tablonun IV. grubunda bulunan (C, Si, Ge) element yarıiletkenleridir. Diğerisi ise III. (B, Al, Ga, In) ve V. grup (P, As, Sb) elementlerinin bileşimi ile oluşan GaAs gibi bileşik yarıiletken malzemelerdir. Tek cins atomların birleşmesiyle oluşan elementsel malzemelere örnek Si ve germanyum (Ge) verilebilir. Silisyum entegre devrelerde en çok kullanılan yarıiletken malzemelerden biri olup gün geçtikçe Si ile ilgili çalışmalar artmaktadır. Silisyum aynı zamanda silikon olarak da anılmakta ve yaygın biçimde çip üretiminde kullanılmaktadır. Büyük çip üreticisi firmaların merkez ofislerinin bulunduğu Amerika' daki San Jose vadisi de sektörde 'Silikon Vadisi' olarak bilinmektedir. Diğer taraftan, bu çalışmada kullanılan ikili (binary) bileşik yarıiletkenlerden galyum arsenayt (GaAs)' da en yaygın kullanılan ikili yarıiletkenlerdendir. GaAs, yüksek hız gerektiren

uygulamalarda ve optik özelliklerinin iyi olmasından dolayı optoelektronik uygulamalarda tercih edilmektedir.

Yarıiletken tabanlı aygıtların elektronik ve optoelektronik devrelerde devre elemanı olarak kullanılması katıhal fiziğinin en önemli ticari uygulamalarından biridir. Schottky engel/bariyer diyotları (SBDs) temelde metal ve yarıiletkenin birbiriyle yüksek sıcaklık ve düşük basınç ortamında mümkün olan en az dirençle (idealde sıfır) sıkı bir şekilde kontak edilmesiyle oluşturulur. Metal-yarıiletken (MS), metal yalıtkan/polimer-yarıiletken (MIS/MPS) tipi Schottky bariyer diyotlar, güneş pilleri (SCs), fotodedektörler (PDs), hızlı anahtar (switching) uygulamaları, varaktörler (kapasiteleri uygulanan gerilimle değişen kondansatörler), alan etkili transistörler (AET/FETs) ve mikro dalga devre elemanları gibi birçok elektronik aygıt, yarıiletken endüstrinin temelini oluşturur (Bilkan, 2016). Entegre devrelerin ticaretinin her yıl milyarlarca dolar tutmakta olduğu düşünüldüğünde, bu çalışmanın da konusu olan Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (Metal-Insulator-Semiconductor) Schottky bariyer diyotlar günümüzde geniş çalışma alanıyla birer entegre devre elemanı olarak yoğun ilgi görmektedir.

Metal ile yarıiletkeni birbirinden izole etmek, yük geçişlerini düzenlemek ve ara yüzeyde meydana gelen bazı akım iletim mekanizmalarını daha da iyileştirebilmek amacıyla metal/yarıiletken (M/S) ara yüzeyine yapay olarak inorganik ya da organik (polimer) yüzeyler büyütülebilir. Bütün yarıiletken aygıtların kararlılığında ve güvenilirliğinde ortaya çıkan problemlerin çoğu yüzey koşulları ile yakından alakalı olduğu için, MIS kapasitörler yardımıyla yüzey fiziğini anlamak aygıt uygulamalarında büyük önem taşır. Literatürde MS, MIS ya da MPS yapılar ile ilgili farklı çalışmalar olmasına rağmen muhtemel akım iletim mekanizmaları, M/S ara yüzeyinde oluşan engelin biçimi, yapısı ve elektriksel karakterizasyonu ile ilgili hala bilinmeyen ve iyileştirilmesi gereken özellikler bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı Schottky engel diyotların akım iletim mekanizmalarının özellikle geniş frekans, sıcaklık ve voltaj aralığında incelenmesi önemlidir. Akım iletimi esnasında hangi akım iletim mekanizmasının baskın olacağını belirleyen birçok etken mevcuttur. M/S ara

yüzeyinde oluşan engel yüksekliği, doğal ya da yapay ara yüzey tabakası, yüzeyin hazırlanma süreci, M/S arayüzeyinde yasak enerji aralığında oluşan yüzey durumlarının enerji yoğunluğu dağılımı ve yarıiletkenin katkı konsantrasyonu bu etkenler arasında sayılabilir (Taşcıoğlu, 2012).

MS, MIS ya da MPS tipi Schottky diyotlarda akım iletim mekanizmaları özellikle düşük sıcaklıklarda ve yüksek katkılı yarıiletkenlerde oldukça karmaşıktır. Bu yapılarda akım-voltaj (I-V) karakteristikleri, genelde termoiyonik emisyon (TE) teorisine göre incelenir. Bu teori oda sıcaklığı veya üzerindeki sıcaklıklarda geçerlidir. Diğer taraftan sadece oda sıcaklığındaki I-V karakteristikleri, akım iletim mekanizması ve M/S ara yüzeyinde oluşan engelin biçimi hakkında bize detaylı bilgi sağlayamaz. Özellikle düşük sıcaklıklarda idealite faktörünün 1' den çok büyük oluşu TE teorisi ile veya metal-yarıiletken arasında doğal ya da yapay olarak oluşan ara yüzey tabakasının kalınlığı ile açıklanamaz. Geniş bir sıcaklık aralığı seçilerek muhtemel akım iletim mekanizmaları detaylı incelenmelidir. Bir yarıiletken aygıtın performansını etkileyen faktörlerin başında ara yüzey tabakası, alıcı veya verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_A , N_D), yapının seri ve kısa devre dirençleri (R_s ve R_{sh}), M/S arayüzeyine yerleşmiş ara yüzey durumları (N_{ss}), oluşan engelin biçimi ve aygıtın sıcaklığı gelmektedir. Bu yapılarda doğru ve ters beslemde iletimin doğası oldukça farklı olduğundan akım-voltaj (I-V) ve kapasite-voltaj (C-V) eğrileri büyük önem arz etmektedir.

Doğru beslem I-V ölçümlerinden, temel diyot parametreleri olan ters beslem doyma akımı (I_0 ya da I_s), idealite (kalite) faktörü (n), sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{bo}), R_s ve R_{sh} , sıcaklığın fonksiyonu olarak elde edilebilmektedir. Ayrıca N_{ss} , Φ_{bo} ve n' nin voltaja bağlı değişimi ile diyodun R_s değeri dikkate alınarak akım iletim mekanizması incelendiğinde M/S ara yüzeyinde oluşan engelin tek olmayıp ortalama bir engel civarına yerleşmiş birçok irili ufaklı engellerden veya patikalardan oluşabileceği de gözlemlenmiştir. Bu durum çift Gaussian dağılımı (DGD) ile açıklanabilmektedir. Bu dağılım modeline göre düşük sıcaklıklarda ortalama engelin üzerinden geçecek kadar enerjisi olmayan çoğunluk taşıyıcıları (n -tipi yarıiletkende elektronlar) bu küçük engellerden veya patikalardan geçerek akımın, dolayısıyla da idealite faktörünün artmasına

yol açmaktadır. Sıcaklık arttırılmaya devam edilirse, ortalama engeli geçebilecek kadar enerji kazanan çok sayıdaki elektron bu engeli rahatlıkla aşabilmektedir. Başka bir deyişle TE teorisi etkin olmaya başlamaktadır. Ancak düşük sıcaklıklarda TE teorisinden ciddi oranda sapmalar gözlenmiştir. Genellikle Schottky tipi diyotlarda akımın artan voltajla üstel olarak artması beklenirken uygulamada bu durum ara yüzey tabakası, seri direnç ve ara yüzey durumlarından dolayı farklılıklar göstermektedir. Deneysel uygulamalarda çoğunlukla azalan sıcaklıkla idealite faktöründe hızlı bir artma, engel yüksekliğinde ise azalma gözlenir. Engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla artması literatür de beklenen negatif sıcaklık katsayısına aykırıdır. Çünkü engel yüksekliğinin yarıiletkenin yasak enerji aralığına benzer şekilde artan sıcaklıkla azalması beklenir. İşte idealite faktörünün düşük sıcaklıklarda ideal durumdan ($n=1$) büyük sapma göstermesi ve engel yüksekliğinin artan sıcaklıkla artması son zamanlarda Gaussian Dağılımı (Güçlü vd., 2016a; Tecimer vd., 2013; Reddy vd., 2015; Özavcı vd., 2013; Afandiyeva vd., 2013; Dökme, 2011), kuantum mekaniksel tünelleme (TAE/TFE, AE/FE) (Padovani ve Stratton, 1966; Crowell ve Rideout 1969; Padovani 1971; Rideout ve Crowell 1970; Chang and Sze 1970) ya da T_0 etkisi (Saxena, 1969; Crowell, 1977; Özerli vd., 2014) ile açıklanmaktadır.

Bir metalin Φ_m iş fonksiyonu bir elektronu Fermi enerji seviyesinden (E_F), metal yüzeyin dışındaki durgun (vakum) seviyesine çıkarmak için gerekli enerji miktarıdır. İş fonksiyonu kuantum mekaniği kullanılarak hesaplanırsa iki kısımdan meydana geldiği görülür; elektronun, kristalin periyodik potansiyeline bağlı enerjisi ile elektronun diğer elektronlarla etkileşimini temsil eden bir hacim katkısı ve yüzeyde bir çift kutup (dipol) tabakasının olası varlığından dolayı yüzey katkısı. Genellikle, metal yüzeyinde atomların etrafındaki elektron yük dağılımı çekirdeğe göre simetrik yerleşmemiştir. Buna göre pozitif ve negatif yük merkezleri bir dipol (çift kutup) tabakası oluşturacak şekilde birbirleriyle çakışmaz. Aynı şekilde, bir yüzeyle ilişkili gevşeme ve yeniden yapılanma olayı da dipol tabakalarına neden olabilir. Eğer ortaya çıkan dipol tabakası, birim alan başına bir ρ elektrik dipol hareketine sahipse boşluk ile metalin içi arasında ρ/ϵ_0 büyüklüğünde elektrostatik potansiyel farkı

bulunacaktır. Elektrostatik potansiyeldeki bu değişimden dolayı bir elektronun $q\phi/\epsilon_0$ enerjisindeki değişim, iş fonksiyonu kısmını meydana getirir. Örnek olarak, yüzey elektron yük dağılımında temiz bir metal yüzeydeki gaz atomlarının tutulması yoluyla meydana gelebilecek herhangi bir değişiklik, dipol tabakasında dolayısıyla da Φ_m' de değişime yol açacaktır. Eşit büyüklükte olmayan yüzey dipollerinden dolayı aynı kristalin farklı kristalografik yüzeyleri farklı Φ_m değerlerine sahiptir. Örneğin tungstenin (110), (100) ve (111) yüzeylerinin iş fonksiyonları sırasıyla 5.25, 4.63, 4.47 eV olarak rapor edilmiştir (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Kwok, 2007; Sharma, 1984; Özavcı vd., 2013).

Bir yarıiletkenin Φ_s iş fonksiyonu, Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farklıdır ve aynı zamanda hacim ve yüzey katkılarından oluşur. Yarıiletkende fermi seviyesinde genellikle izin verilen hiçbir enerji seviyesi bulunmadığı zaman, bu tarzda tanımlanan bir iş fonksiyonu garip görülebilir, fakat iş fonksiyonunun istatistiksel bir kavram olduğu ve bir elektronu sırasıyla, değerlik (valans) ve iletkenlik bantlarından uzaklaştırmak için gerekli enerjinin ağırlıklı ortalamasını temsil ettiği göz önünde bulundurulmalıdır.

Son dönemlerde doğru beslem I-V karakteristiklerinde gözlenen artan sıcaklıkla engel yüksekliğinin artması ve idealite faktörünün azalması genelde engel homojensizliğiyle açıklanmaktadır (Güçlü vd., 2016a; Saad ve Kaas, 2003; Demirezen vd., 2013; Ishaque vd., 2011; Parish vd., 2008; Arehart vd., 2011). Bu metod Gaussian dağılımı olarak da bilinmektedir. Bu metota göre düzgün engel yüksekliği civarında düşük engel yüksekliklerine sahip çok sayıda küçük lokal bölgelerin var olduğu kabul edilir. Bu lokal bölgelerden geçen akım, uygulanan gerilime ve patika (patch) parametresine bağlı olan etkin engel yükseklikli diyottan geçen akıma benzerdir. Dolayısıyla diyottan geçen toplam akım, lokal (bölgesel) alanlardan geçen akım ile düzgün engel yükseklikli tüm bölgeden geçen akımların toplamıdır. Birçok araştırmacı, engel homojensizliğinin artması durumunda hem daha yüksek idealite faktörü hem de daha küçük etkin engel yükseklikleri elde etmişlerdir (Pakma vd., 2008; Demirezen vd., 2010; Horvarth,

1996; Schmitsdorf vd., 1995; Kampen vd., 2002; Roberts ve Evans, 2005; Chand ve Kumar, 1996).

Arayüzey tabaka oluşurken M/S arayüzeyinde yarıiletkenin enerji bant yapısını değiştiren, aygıtın performansını etkileyen safsızlıklar ve yapısal kusurlar meydana gelebilir. Bu nedenle MS kontaklarda metal ile yarıiletkeni birbirinden izole etmek, aralarındaki yük geçişlerini düzenlemek ve sızıntı (kaçak) akımını azaltmak için geleneksel SiO_2 yerine daha yüksek dielektrikli tabakalar kullanılmaktadır. Metal-yarıiletken arasına depolanan ince arayüzey tabakası MS yapıyı MIS/MPS ya da MOS yapıya dönüştürür. Dolayısıyla yapının karakteristikleri bu durumdan etkilenir. Örneğin, bir MIS yapıda arayüzeydeki yalıtkan malzemenin rolü, metal ve yarıiletken arasında arayüzey difüzyonunu ve etkileşimini önlemek olduğundan bu yapı, arayüzey katmanının dielektrik özelliği sayesinde elektrik yükünü depolayan bir kapasitör gibi davranır. Bir Schottky engel diyodunda arayüzey difüzyonunu önlemek için MS arayüzeydeki, kalay dioksit (SnO_2), silisyum nitrür (Si_3N_4), titanyum dioksit (TiO_2), hafniyum dioksit (HfO_2) gibi yalıtkan tabakalardan ziyade entegre devreler için kullanılabilen yalıtkan malzeme olan geleneksel Al_2O_3 , araştırmacıların dikkatini çekmiştir. Ancak bu tabakaların oluşturulması hem zor hem de yüksek enerji gerektirmektedir (Sharma, 1984). Yalıtkan tabakayı seçerken yüzeyi pasivize edecek, sızıntı akımını en aza indirecek, kontrol edilebilir akım iletim mekanizması oluşturabilecek, doğrultma özelliği kuvvetli malzemeler seçmeye gayret gösterilmesi gerekmektedir. İnce arayüzey metaryalleri, yapının seri direncini ve ara yüzey durumlarını önemli ölçüde azaltırken diğer taraftan kısa devre direncini arttırmaktadır. Bu yolla hem uygulanan voltajın büyük bir kısmının diyot üzerine düşmesi hem de diyot üzerinden daha fazla akım geçişi sağlanabilmektedir (Tecimer, 2014). Bünyesindeki yalıtkan tabakanın dielektrik özelliğinden dolayı MIS yapılar paralel plakalı bir kondansatöre benzerdir. Aradaki yalıtkan tabakanın $100\text{\AA}$ ' den büyük olması durumunda MOS olarak adlandırılmaktadır. Eğer bu yalıtkan tabaka çok ince ise ($\sim 10\text{-}40\text{\AA}$), yapı 'MIS tipi Schottky diyot' olarak adlandırılmakta ve elektriksel parametreleri sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri ile C-V ölçümlerinden belirlenmektedir. Kalın yalıtkan tabakalı MIS veya MOS yapılarda ise, elektriksel ve dielektrik parametreler

genellikle sıcaklığa bağılı $C-V$ ve $G/\omega-V$ ölçümlerinden hesaplanmaktadır. Yani bu yapının belirgin özellikleri paralel plakalı kondansatörde olduğu gibi yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzey özellikleri tarafından belirlenmektedir (Yücedağ, 2007).

Arayüzey yalıtkan tabakanın kalitesinin iyi olmaması ve Fermi seviyesi mihlanması mikroelektronik endüstrisinde kullanımı olumsuz etkiler. Bu istenmeyen durum metal ve yarıiletken arasına yüksek dielektriklerin girişi ile silinebilir. Bu yüksek dielektrik malzemelerin kullanımı sadece metal ve yarı iletken arasındaki difüzyonu önlemekle kalmaz aynı zamanda yüzey yükleri ve kusurları pasifleştirir ve böylece aygıtın performansını güçlendirir.

GaAs, III-V grubu yarıiletken olup, diyot, transistör, güneş pilleri gibi yarıiletken aygıtların yapımında önemli bir malzeme olarak göze çarpar (Wang vd., 2004) Özellikle GaAs tabanlı aygıtların yüksek hızlı, düşük güç tüketimli aygıtlar olduğu tespit edilmiştir (Ambrico vd., 2005). Dolayısıyla GaAs tabanlı, farklı tipteki MS yapılar üzerine yoğun çalışmalar yapılmıştır (Güçlü vd., 2016a, b; Tecimer vd., 2013; Özavcı vd., 2012; Karataş vd., 2005; Vural vd., 2010). GaAs yüksek mobiliteye (hareketliliğe) sahip olduğundan katkı atomlarının konsantrasyonu genelde yüksektir. Dolayısıyla metal/GaAs Schottky diyotlarında özellikle düşük sıcaklıklarda kuantum mekaniksel tünelleme (termoionik alan emisyonu (TAE) ve alan emisyonu (AE)) teorileri etkin olur. Bu tür yapılarda akım iletim mekanizmaları henüz yeterince aydınlatılamamıştır. Çünkü bu çalışmaların çoğunda sıcaklık ve voltaj aralığı sınırlandırılmıştır. Ayrıca, GaAs direkt enerji band aralığına sahiptir ve geleneksel silikona göre daha yüksek mobiliteler, daha yüksek doymuş elektron hızı ve daha yüksek bozunma alanına sahip olmasından dolayı tercih sebebidir. Genellikle, yüksek frekans ve düşük güç uygulamaları için kullanılır.

Kapasitans (C) ve kondüktans (G/ω) karakteristikleri ise taşıyıcıların özellikle düşük frekanslarda dışarıdan uygulanan sinyali takip edebilme yeteneğine bağılı olarak değişebilir. Düşük frekanslarda azınlık taşıyıcılarının (elektron veya hol) iletimi sinyal değişimi ile sürdürülür. Bu şekilde de yüklerin geçişi sağlanır.

Yani, yüzey durumları ve tuzaklardaki yükler düşük frekansta dışarıdan uygulanan sinyali kolayca takip edebilmektedir. Düşük frekanslarda tuzak yüklerinin durulma zamanı/yaşam ömrü (τ), uygulanan sinyalin periyodundan ($T=2\pi/\omega$) daha düşüktür. Bu durum ara yüzey durumlarının ya da tuzak yüklerinin ölçülen kapasitansa ilave bir kapasitans olarak eklenmesine yol açar. Diğer yandan yüksek frekanslarda ($f \geq 500 \text{ kHz}$) yüzey durumları dışarıdan uygulanan sinyali takip edemediği için ölçülen kapasitansa ya da kondüktansa yüzey durumlarından kaynaklı herhangi bir katkı gelmez. Bu sebepten yüksek frekanslardaki C ve G değerleri yüzey durumlarından kaynaklanan etkileri içermez. Genellikle MIS diyotlarda küçük sinyal enerji kayıplarının N_{ss} ve tuzak seviyeleri ile diyodun seri direnci olmak üzere iki kaynağı vardır. Diğer bir deyişle ideal durumda, MIS/MPS ve ya MOS yapıların kapasitansı genellikle frekanstan, özellikle de yüksek frekanslardan bağımsızdır. Ancak, düşük frekanslarda durum farklıdır. Özellikle, yarıiletken bant boşluğunda yarıiletken/arayüzey tabakası arasında yerleşik yüzey tuzakları, kısa zamanda yarıiletkenle kolayca yük alışverişi yapabilir. Bu yüzden, *a.c.* sinyalinin frekansına bağlı olarak, özellikle zayıf tersinim ve tükenim tabakalarında aşırı kapasite ve iletkenliğe neden olan yüzeydeki tuzak yüklerinden dolayı ölçülen kapasitans ve iletkenliğe ek bir kapasitans ve iletkenlik bulunabilir. Ayrıca metal-oksit-yarıiletken alan etkili transistör (MOSFET), diğer devre elemanlarıyla birleştğinde voltaj kazancı ve sinyal-güç kazancı yeteneğine sahiptir. MOSFETlerin binlercesi dijital devre uygulamalarında ve nispeten küçük boyutlarından dolayı da basit entegre devrelerinde kullanılabilir. Şüphesiz ki MOSFETler, entegre devre tasarımlarının çekirdeğini oluştururlar. MOS kapasitör olarak bilinen bir metal-oksit-yarıiletken yapı MOSFET'in kalbidir. Bir MIS ya da MOS yapıda, teknolojiye öneminden dolayı düşük maliyetle daha yüksek verimliliğe sahip oksit arayüzey tabakasının elde edilmesi bu tez çalışmasında da amaçlanmıştır.

GaAs alttaş üzerine yüksek kalitede Al_2O_3 büyütebilmek için kimyasal buhar depolama (CVD) (Ohshita vd., 2002), atomik katman depolama/kaplama (ALD) (Karabulut, 2014; Fan vd., 2013), moleküler demet epitaksi (MBE) (Lee vd., 2007) ve püskürtme (Khomenkova vd., 2010) gibi birçok çöktürme teknikleri

kullanılmaktadır (Verrelli vd., 2008). MIS yapının fiziksel ve elektriksel özellikleri ara yüzey tabakasının oluşturulmasına ve yüzey hazırlama koşullarına güçlü bir biçimde bağlıdır (Bülbül vd., 2010; Ounnoughi vd., 1997; Sztkowski vd., 1992; Cova vd., 1997; Altındal vd., 2005; Chattopadhyay vd., 1993; Özdemir vd., 2011). Diğer yöntemler cazip sonuçlar doğurmuş olmasına rağmen son dönemlerde en popüler ince film büyütme tekniklerinden biri Atomik Katman Depolama (Atomic layer deposition-ALD) yöntemidir. Bu çalışmada da tercih edilen yöntemdir. ALD yöntemi ile daha kaliteli bir arayüzey elde edilmesinin yanı sıra yüksek- k filmlerde kusurların yoğunluğu azaltılmaktadır. ALD tekniğinin avantajlı ve kontrollü bir teknik oluşu film büyütürken her bir döngünün tam anlamıyla aynı miktar malzemeyi biriktirebilme özelliğinden kaynaklanır. Bu yöntemle biriktirilen ince filmin kalınlığı uygulamada kullanılan döngü sayesinde kolayca belirlenir. ALD tekniği diğer tekniklerle kıyaslandığında mükemmel bir dizilim ve boşluk doldurma yeteneklerine sahip olduğundan ince film kusur oranları diğer film büyütme tekniklerine oranla çok daha azdır. Ayrıca ALD tekniğinin sağladığı en önemli avantajlardan biri de biriktirilen film kalınlığının nanometre mertebesinde yani atomik seviyelerde oluşudur. Tüm bunlardan hareketle; burada metalik kapı oksiti olarak Al_2O_3 depolanmasında muntazam bir dizilim ve kalınlığın hassas olarak kontrol edilebilmesi nedeniyle ALD tekniği diğer tekniklere tercih edilmiştir. ALD ile büyütülen filmlerin elektrik ve optik özellikleri üzerine literatürde çalışmalar mevcuttur. Son dönemlerdeki birkaç çalışma özetlenebilir. Bunlar, Ye vd. (2005) kapı dielektrik materyali olarak ALD ile sentezlenmiş Al_2O_3 kullanarak galyum nitrit (GaN) yarıiletkeni üzerine metal-oksit-yarıiletken yüksek elektron mobiliteli transistör (MOS-HEMT) yapmışlar; daha sonra da benzer tasarıma sahip geleneksel GaN HEMTlerle karşılaştırdıklarında mevcut HEMT' in olumlu karakteristikler sergilediğini gözlemlemişlerdir. Mevcut MOS-HEMT aygıtların hem düşük hem de yüksek enine alanlar altında, düşük kaçak akım, yüksek kesme (breakdown) voltajı, güçlü birikim ve yüksek etkili 2D elektron hareketliliği gösterdiğini ifade etmişlerdir. Bu çalışma kapı dielektriği olarak Al_2O_3 kullanılmasından dolayı dikkate değerdir. Cheng vd. (2012), tepkiyen olarak SnO_2 ve H_2O kullanarak 300 ile 450°C arasındaki sıcaklıklarda ALD tekniği ile büyüttükleri SnO_2 ince

filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu, taşıyıcı mobilitesi, elektriksel direnci gibi özellikleri üzerine biriktirme sıcaklığının etkisini açıklamışlardır. Dhakal vd. (2012), atomik tabaka biriktirme metoduyla büyüttükleri Al katkılanmış çinko oksit (ZnO) filmlerin geçirgenlik ve iletkenlik ölçümlerini incelemişlerdir.

Bu çalışmada Schottky bariyer diyotların performansını geliştirebilmek amacıyla ara yüzey tabaka olarak yüksek dielektrik sabitli Al_2O_3 ara yüzey tabaka farklı kalınlıklarda kullanılmıştır. Çünkü literatürde bu ara yüzey tabakanın farklı kalınlıklarda kullanımının elektriksel ve dielektrik özellikleri üzerine etkisi hususunda bir açık bulunduğu tespit edilmiştir. Çalışmanın ana amacı $Au/Ti/Al_2O_3/n-GaAs$ MIS yapısının oda sıcaklığında C-V ve $G/\omega-V$ eğrilerinin dolayısıyla bu eğrilere bağlı dielektrik karakterizasyonunun (0,5kHz-5 MHz) frekans aralığında ara yüzeyi farklı kalınlıktaki her bir numune için incelenmesidir. Dolayısıyla C-V eğrilerinde oluşan anormal pik davranışı, R_s ve N_{ss} ' nin pozitif ve negatif voltajda C-V ve $G/\omega-V$ eğrilerine etkisi de araştırılmıştır. Üzerinde önemle durulan önemli noktalardan bir diğeri de sıcaklığa bağlı doğru beslem C-V eğrilerinde gözlenen anormal (anomalous) pik davranışı ile negatif kapasitans (NC) ve negatif dielektrik sabiti (NDC) gözlemidir. Son yıllarda doğru beslem C-V eğrilerinde oluşan anormal pik davranışı hakkında çeşitli çalışmalar yapılmakta ve bu çalışmaların herbiri de farklı yorumlar içermektedir. Bu çalışmalardan birkaçını sıralayacak olursak; Vural vd. (2012); Bilkan vd. (2015); Gökçen vd. (2012); Altındal vd. (2011)' dir. Diğer taraftan, son yıllarda, MS veya MIS tipi Schottky diyotların elektriksel özellikleri de ara yüzey durumları, ara yüzey tabaka etkisi ve seri direnç göz önüne alınarak incelenmiştir (Chattopadhyay vd., 1993; Bülbül vd., 2006; Altındal vd., 2008; Özdemir vd., 2011; Aldemir, 2013).

Kapasitans ve empedans spektroskopisi deneysel verilerin doğru değerlendirilmesi sonucunda aygıt fiziğini derinlemesine anlamamızı sağlar. Bazı durumlarda kapasitans özellikleri alışılmışın dışında, normal olmayan davranışlar sergileyebilir. Bunların en önemlilerinden birisi de bu çalışmada da gözlenen NC ve NDC fenomenidir. Negatif kapasitans etkisi $p-n$ eklemler, Schottky diyotlar, MIS ve MPS yapılar gibi çok çeşitli elektronik devre elemanında gözlenmiştir (Ershov vd., 1998). NC' nin fiziksel mekanizması

yapıdan yapıya farklılık göstermektedir. NC' nin kaynağı literatürde çokça tartışılmış olmasına rağmen fiziksel anlamı henüz tam olarak anlaşılamamıştır. NC etkisi literatürde olağan dışı ya da normal olmayan olarak adlandırılmaktadır. Çoğu durumda deneysel olarak elde edilen NC verileri negatif kapasitans etkisinin sebep olduğu karışıklıktan dolayı literatürde fazla yer almamıştır (Ershov vd., 1998). Bu çalışmaya göre NC etkisi üç kaynak altında toplanabilir. Bunlar, yarıiletkende azınlık taşıyıcıların yüksek orandaki hareketi, iyonizasyon süreci etkisi nedeniyle metal ile yarıiletken arasına yerleşmiş olan ara yüzey yükleri ile ara yüzey durumlarının azalması ve R_s ' dir.

Yarıiletken ve metal üst kontak arasındaki ara yüzey tabakanın varlığı diyot karakteristiklerinin değişmesine neden olur. Dielektrik maddeler diğer bir deyişle yalıtkanlar elektriği iletmeyen ancak uygulanan elektrik alandan etkilenen maddelerdir. Elektrik alan etkisiyle elektron ve atomlar yer değiştirerek elektrik yük merkezleri kayar ve elektriksel kutuplanma meydana gelir. Oluşan elektrik dipoller, dielektrik maddenin yüzeyinde elektriksel yük birikmesine neden olur. Malzemeye dışarıdan bir elektrik alan uygulandığı zaman enerji depolama yeteneğine sahipse 'dielektrik' olarak adlandırılır (Oral, 1983; Tareev, 1979). Dielektrik sabiti bir alanın etkisi altında dış elektriksel bölgede ne kadar enerji saklandığını ve malzeme içerisinde ne kadar enerji kaybolduğunu gösterir. Malzemenin dielektrik sabiti iki elektrik yükü arasındaki elektrostatik kuvveti azaltan bir ölçüdür. Dielektrik malzemeler, elektrik alana uzun süre karşı koyabilirler ve doğru gerilim (dc) uygulandığında elektrik akımının geçmesine karşı büyük direnç gösterirler. Bu sebepten iletken maddelerle temel özellikleri bakımından farklılık gösterirler. Teorik olarak yalıtkan malzemelere dc gerilim uygulandığında akım geçişi olmaz. Bu duruma dielektrik (yalıtkan) maddenin öz direnci çok büyüktür denilebilir. Ancak pratikte, kullanılan yalıtkan maddelere dc gerilim uygulandığında çok küçük de olsa bir sızıntı akımı taşırlar. Bu yüzden yalıtkan maddelerin öz direnci ne kadar büyük olsa da sonlu bir değere sahiptir. Yalıtkanın öz direnci ne kadar büyükse kalitesi de o oranda iyi olur.

Sonuç olarak; hazırlanan MS ve MIS veya MPS tipi yarıiletken aygıtların gerek elektriksel gerekse dielektrik ve iletkenlik özellikleri; özellikle yapının seri direnci, M/S arayüzeyinde oluşan ara yüzey durumları, engelin biçimi, numunenin sıcaklığı, uygulanan voltaj, M/S arayüzeyinde doğal veya yapay olarak oluşan engel kalınlığı ve homojenliğine oldukça bağlıdır (Rhoderick ve Williams, 1988; Cowley ve Sze, 1965; Özavcı vd., 2013; Sharma, 1984; Ershov vd., 1998; Bülbül vd., 2006; Güçlü vd., 2016a, b). Bundan dolayıdır ki sıcaklığa ve frekansa bağlı ölçümlerde C-V ve G/ω -V karakteristiklerindeki değişim özellikle düşük frekans ve sıcaklıklarda son derece belirginleşmektedir. Bu açıdan, hazırlanan yarıiletken aygıtların hem elektrik hem de dielektrik özelliklerinin düşük frekans ve sıcaklıklarda incelenmesi oldukça karmaşık olduğu için önem taşımaktadır. MIS yapıların yüzey kararlılığı, elektronik aygıtların üretiminde güvenilirlik açısından önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada; Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS yapısı incelenirken özellikle düşük sıcaklık ve geniş frekans aralığı seçilmesine özen gösterilmiştir.

Bu çalışmada, farklı kalınlıklarda Al₂O₃ ara yüzey tabakalı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs (MIS) numunelerinin I-V, C-V ve G/ω -V ölçümleri (80-400K) sıcaklık (1kHz-1MHz) frekans aralığında (oda sıcaklığında) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kaybı (ϵ''), kayıp tanjant ($\tan \delta$) ve *ac* iletkenlik (σ_{ac}), *ac* direnç (ρ_{ac}) ve elektrik modülü (M^*) gibi dielektrik özellikleri üzerine sıcaklık ve frekans etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Elinizdeki bu çalışma altı ana bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde Schottky diyotlara genel bir bakış, ikinci bölümde kaynak özetleri, üçüncü bölümde kuramsal temeller ile Schottky diyotların tarihsel gelişimi, dördüncü bölümde ise Al₂O₃ ara yüzey tabakalı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS numunelerinin fabrikasyon sürecine yer verilmiştir. Beşinci bölümde elde edilen deneysel sonuçlarla ilgili grafikler ve çizelgeler verilerek mevcut literatürle kıyaslanarak yorumlanmıştır. Son bölümde ise I-V, C-V ve G/ω -V karakteristikleri ile ilgili elde edilen deneysel sonuçlar mevcut deneysel ve teorik çalışmalarla kıyaslanarak yorumlanmış ve bu konuda bundan sonra yapılabilecek çalışmalarla ilgili görüş ve öneriler sunulmuştur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Prabakar vd. (2003) çalışmalarında $\text{Cd}_{0.8}\text{Zn}_{0.2}$ ince filmlerini vakum buharlaştırma tekniği ile hazırlamışlardır. Dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp tanjantının varyasyonunun sıcaklığa ve frekansa bağlı olduğunu bulmuşlardır. İnce filmlerin mikro yapılarının detaylarına bir bakış açısı kazandırmak için, empedans ve elektriksel modülüs formalizmlerini kullanmışlardır. Relaksasyon mekanizması üzerine yapılan bu kapsamlı çalışma, film kalınlığı boyunca tane ve tane sınırlarının varlığının temel gevşeme olgusu olduğunu ortaya koymuştur. Kayıp tanjant ve spektroskopik modülüs mekanizmalarından hesaplanan aktivasyon enerjilerinin 230-800 nm kalınlıklardaki film için 1.24 ile 0.91 eV arasında değiştiğini bulmuşlardır. Modülüs özelliklerinin frekans analizi, gevşeme sürelerinin bir dağılımını göstermiştir. Yüksek frekanslarda, frekansa bağlı iletkenlik eğrileri evrensel güç yasasına uyulmasını önermiştir. Bu çalışmada iletim ve tane sınırlarının iletimdeki rolü gerekçeleriyle tartışılmıştır. Çalışılan film kalınlıkları için kusur yoğunluğu 2 ile $5 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1}\text{m}^{-2}$ arasında değişmiştir.

Janardhanam vd. (2009) çalışmasında $\text{Mo}/n\text{-InP}$ Schottky kontaklarının elektriksel karakteristiklerindeki değişim 200-400K sıcaklık aralığında I-V ve C-V ölçümleri kullanılarak, sistematik bir şekilde sıcaklığın fonksiyonu olarak araştırılmıştır. Bu çalışmada; idealite faktörü (n) ve sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{b0}) gibi diyot parametrelerinin sıcaklığa kuvvetle bağlı olduğu, sıcaklık artarken Φ_{b0} (I-V)' nin arttığı; n ' nin azaldığı görülmüştür. I-V özellikleri, TE teorisi ve metal-yarıiletken arayüzeyinde baskın olan bariyer homojensizliklerinden dolayı bariyer yüksekliklerinin Gaussian dağılımı varsayımı temelinde analiz edilmiştir. Φ_{b0} ' nin $1/2kT$ eğrisi, sıfır beslem engel yükseklikleri için bir Gaussian dağılımının kanıtı olarak çizilmiş ve bu doğrudan $\sigma_0 = 144 \text{ meV}$ sıfır beslem standart sapması ile görünen engel yüksekliği elde edilmiştir. Modifiye edilmiş Richardson grafiğinden ortalama bariyer yüksekliği ve Richardson sabiti (A^{**}) sırasıyla; 0.85 eV ve $2.54 \text{ A cm}^{-2}\text{K}^{-2}$ olarak elde edilmiştir. $\text{Mo}/n\text{-InP}$ Schottky diyotunun I-V karakteristiklerinin

sıcaklık bağımlılığı, Schottky bariyer yüksekliklerinin (SBHs) Gaussian dağılımı ile TE mekanizması temelinde başarı ile açıklanmıştır.

Tunç vd. (2010) çalışmasında Au/PVA/Ni, Zn/*n*-Si Schottky diyotların dielektrik özellikleri ve ac elektriksel iletkenliği (0.5kHz-10MHz) frekans ve (-2V)-(+5V) voltaj aralığında C-V ve G/ω-V ölçümlerinden empedans tekniği ile belirlenmiştir. Polimerik metal-yarıiletken arayüzey frekans ve voltajın fonksiyonu olarak incelenmiştir.

Dökme ve Altındal (2011) çalışmasında Al-TiW-Pd₂Si/*n*-Si Schottky diyotun elektrik ve dielektrik özelliklerini (300-400K) sıcaklık aralığında ve iki frekans değerinde (50kHz ve 500kHz) incelemişlerdir. G/ω-V-T karakteristiklerinden dielektrik özelliklerin sıcaklığın şiddetli bir fonksiyonu olduğunu saptamışlardır. Ayrıca TiW-Pd₂Si/*n*-Si yapısına R_s etkisini C-V-T ve G/ω-V-T profillerinin normal olmayan davranışlarından belirlemişlerdir.

Çavdar vd. (2011) çalışmalarında, hızlı soğutma metoduyla cam seramik süperiletkenler hazırlanmıştır. (10kHz-10MHz) frekans, (80-300K) sıcaklık aralığında ε', ε'' ve tanδ değerleri, C-V ve G/ω-V ölçümleri kullanılarak hesaplanmıştır. Süperiletkene bulk yapıda Vanadium etkileri, dc elektriksel direnç (ρ) ve σ_{ac} değerleri incelenmiştir. ε', ε'' ve σ_{ac} değerlerinin güçlü bir şekilde sıcaklığa ve frekansa bağlı olduğu görülmüştür. Negatif kapasitansta olağanüstü bir durum gözlenmiş, bu durum polarizasyon etkilerine atfedilmiştir. Ara yüzey polarizasyonu oluşumunun Bi₂Sr₂Ca₁Cu₂O₈ ve Bi_{1.9}V_{0.1}Sr₂Ca₁Cu₂O₈ süperiletkenlerine katkı sağladığı dielektriksel özelliklerde ve elektriksel iletkenlikte sapmalara neden olduğu sonucuna varılmıştır.

Vural vd. (2012) çalışmasında negatif kapasitansın kökenini araştırmak için Al/rhodamine-101/*n*-GaAs Schottky bariyer diyotların C-V ve G/ω-V ölçümleri (110-290K) sıcaklık aralığı ve 1MHz frekans değerinde R_s etkileri göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Deneysel sonuçlar C ve G/ω değerlerinin sıcaklık ve uygulama voltajının güçlü birer fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Güçlü NC fenomeni her bir sıcaklık için C-V eğrilerinde gözlenmiştir. NC değerlerinin

doğru beslem voltajlarında artan sıcaklıkla azaldığı ve bu NC' deki azalmanın kondüktans değerlerinin artışına karşılık geldiği görülmüştür. Doğru beslem bölgesindeki bu tarz C davranışı, metal/yarıiletken arayüzeyindeki lokalize arayüzey yüklerinin impact iyonizasyon süreci sebebiyle azalmasına atfedilmiştir. Ayrıca R_s ' nin büyüklüğünün düşük sıcaklıktaki kapasitansa negatif katkı sağladığı görülmüştür. Ters ve doğru beslem bölgelerinde ölçülen yüksek frekanslı C ve G/ω değerlerinin gerçek diyot kapasitansını elde edebilmek için R_s etkilerinin ortadan kaldırılarak düzeltildiği vurgulanmıştır.

Dökme vd. (2012) bir diğer çalışmada Au/poly (vinyl alcohol) (Co-Ni-doped/*n*-Si Schottky diyot üreterek Polyvinyl alcohol (PVA)/ (Co-Ni) nano fiber filmleri metal-yarıiletken arasına arayüzey olarak kullanmışlardır. ($\pm 1.5V$) kapı voltajında 1MHz frekans değerinde aydınlatmadan önce ve sonra diyot yapısının dielektrik özelliklerini incelemişlerdir. Deneysel sonuçlar dielektrik parametrelerin dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), dielektrik kayıp tanjant ($\tan\delta$), ac elektriksel iletkenlik (σ_{ac}) ve elektrik modülüsün reel (M') ve imajiner (M'') kısımları aydınlatma altında ve karanlıkta birbirlerinden farklı özellikler sergilediğini gözlemlemişlerdir. Dolayısıyla dielektrik özelliklerin aydınlatma yoğunluğunun bir fonksiyonu olduğu sonucuna varmışlardır.

Afandiyeva vd. (2012) çalışmada Al-TiW-PtSi/*n*-Si yapılarda dielektrik özellikler ve ac elektriksel iletkenlik deneysel C-V ve G/ω -V ölçümleri kullanılarak (3kHz-5MHz) frekans ve (-2V)-(+5V) voltaj aralığında ayrıntılı olarak incelenmiştir. Dielektrik özelliklerin uygulanan voltajın ve frekansın şiddetli bir fonksiyonu olduğu görülmüştür.

Eroğlu vd. (2012) 1MHz frekans ve geniş sıcaklık aralığında (120-400K) dielektrik özellikler, iletkenlik, öz direnç, MIS yapılarda C ve G/ω ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. Dielektrik sabit, dielektrik kayıp, kayıp tanjant, ac iletkenlik, ac öz direnç (ρ_{ac}) ve elektrik modülüsün reel ve imajiner kısımları verilen sıcaklık aralığında araştırılmıştır. 280K ve 400K arasındaki sıcaklık artışı ile ϵ' , ϵ'' ve σ_{ac} değerleri exponansiyel artış göstermiştir. Diğer taraftan bu değerler 120K ile 240K aralığında sabit kalmıştır.

Dökme vd. (2012) çalışmasında Al-TiW-Pd₂Si/*n*-Si Schottky diyotların dielektrik ve elektriksel özelliklerine ⁶⁰Co (γ-ray) ışıını etkileri 500kHz frekansta ve oda sıcaklığında C-V ve G/ω-V ölçümleri kullanılarak araştırılmıştır. Seri direnç etkileri göz ardı edilerek ölçülen C_m ve G_m değerlerinden sırasıyla düzeltilmiş kapasitans ve kondüktans değerleri elde edilmiştir. Yüksek-düşük kapasitans (C_{HF} - G_{HF}) metoduyla ışıınım öncesi ve sonrası N_{ss} sonuçları analiz edilmiştir. (N_{ss} -V) eğrileri ile lokalize yüzey durumu bölgeleri metal-yarıiletken yüzeylerde net piklerle gösterilmektedir. σ_{ac} , M' ve M'' nün deneysel değerleri bulunarak- özellikle tükenim ve yığılım bölgelerinde- ışıının ve uygulanan voltajın güçlü birer fonksiyonu olduğu tespit edilmiştir. Dielektrik özelliklerin tükenim ve yığılım bölgelerindeki değişimi incelenmiş, yığılım bölgesinin R_s etkisine neden olduğu da tespit edilmiştir. Diğer bir çalışmasında Au/PVA (Co, Ni-katkılı)/*n*-Si Schottky bariyer diyodun ($\pm 1.5V$) kapı voltajı aralığında 1MHz' de çeşitli aydınlanma düzeyleri öncesi ve sonrasında dielektrik özellikleri (ϵ' , ϵ'' , M' , M'' , $\tan\delta$) ve elektriksel iletkenlikleri (σ_{ac}) araştırılmıştır.

Kaya vd. (2013) çalışmasında Al/SiO₂/*p*-Si (MOS) kapasitörün oda sıcaklığında frekansa ve uygulanan voltaja bağlı dielektrik sabitinin sırasıyla reel ve imajiner (ϵ' , ϵ'') kısımları, elektrik modülüslerin reel ve imajiner kısımları (M' , M''), kayıp tanjant ($\tan\delta$) ve *a.c.* elektriksel iletkenlikleri (σ_{ac}), geniş frekans (1kHz-1MHz) aralığında incelenmiştir. MOS kapasitörün dielektrik özellikleri düz ve ters beslem C-V ve G/ω-V ölçümlerinden elde edilmiştir. Deneysel sonuçlar arayüzey polarizasyonunun düşük frekanslarda daha kolay gerçekleştiğini göstermiştir. Tükenim bölgesinde dielektrik parametrelerin güçlü bir biçimde uygulanan voltaja ve frekansa bağlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Korucu vd. (2013) geniş frekans aralığındaki çalışmalarında G/ω-V ölçümlerinden MgB₂ kompozitlerin ϵ'' incelenmiş ve dört farklı sıcaklık aralığında doğru beslem gerilimi uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki her bir sıcaklık aralığında G/ω ve ϵ'' değerlerinin her ikisi de frekans ve doğru beslem voltajının şiddetli bir fonksiyonudur. G/ω ve ϵ'' değerleri bilhassa düşük frekans ve sıcaklıklarda dikkate değer değişim göstermektedir.

Özavcı (2014) çalışmasında Au/*n*-GaAs Schottky engel diyotların muhtemel akım-iletim mekanizmalarını (80-340K) sıcaklık aralığında I-V ölçümlerini kullanarak incelemiştir. Düşük doğru beslem aralığında (I. Bölge: $V \leq 0.3V$), $\ln I$ -V grafiklerinin eğimleri her sıcaklıkta yaklaşık olarak sabit bir değer olan $27.47V^{-1}$ bulunmuştur. Ancak II. Bölge diye adlandırılan orta doğru beslem aralığında ($\sim 0.35V < V \leq 0.8V$) bu grafiklerin özellikle düşük sıcaklıklarda farklı eğimlere sahip olduğu görülmüştür. Başka bir ifade ile her iki bölge için iletim mekanizmalarının farklı olduğu sonucuna varılmış, eldeki verilerle hazırlanan diyotların akım-iletim mekanizmasının I. Bölge için ters beslem doyuma akımının (I_s) sıcaklığa zayıf bağlı olması, yarı logaritmik I-V eğrilerinin aynı eğime sahip olmasından dolayı engel içerisinde tünelleme (Termoiyonik alan emisyonu (TFE) ve alan emisyonu (FE)) yoluyla olduğu görülmüştür. Burada deneysel I-V-T verilerinden, özellikle düşük ve orta sıcaklıklarda her iki bölge için diğer iletim mekanizmalarından ziyade TFE ve FE teorilerinin baskın olduğu görülmüştür. Ayrıca her iki bölge için sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{b0}) değerlerinin artan sıcaklıkla beklenmedik bir biçimde artması ve idealite faktörünün azalması (n) bu diyotlarda hem aktivasyon enerjisi eğrilerinin lineerlikten sapmasına hem de Φ_{b0} ve n arasında lineer bir ilişki olmasına yol açmıştır. Bu çalışmada Au/*n*-GaAs diyotlarda, sıcaklığa bağlı I-V karakteristiğinin hem düşük hem de orta beslem bölgelerinde Termoiyonik emisyon (TE) teorisi temelli engel yüksekliklerinin çift (double) Gaussian dağılımı ile başarıyla açıklanabildiği görülmüştür. Ayrıca diyotların C/G-V karakteristikleri 10, 100 ve 500 kHz için ayrı ayrı incelenmiştir. Katkı atomlarının yoğunluğu (N_D), Fermi enerjisi (E_F) ve metal-yarıiletken arasında oluşan engel yüksekliği (Φ_b) değerleri sırasıyla 500 kHz' de 80 ve 280K sıcaklıkları için ters beslem C^{-2} -V eğrilerinin lineer kısımlarının eğimlerinden ve V eksenini kestiği noktalardan elde edilmiştir.

Tecimer (2014) çalışmasında ise Au/(Zn-katkılı) Polivinil alkol/*n*-GaAs Schottky engel diyotların elektriksel karakteristikleri, I-V ölçüm metodu kullanılarak (80-350K) gibi geniş bir sıcaklık aralığında incelenmiştir. Doğru beslem I-V ölçümlerinden idealite faktörü (n), sıfır beslem engel yüksekliği (Φ_{b0}), arayüzey durumlarının yoğunluğu (N_{ss}), seri direnç (R_s) ve şönt direnci (R_{sh}) değerleri

hesaplanmış ve tüm bu parametrelerin sıcaklığa oldukça bağlı olduğu görülmüştür. TE teorisi temelli deneysel I-V verilerinin analiziyle yüksek ve düşük sıcaklık bölgeleri için (200-350K ve 80-170K), sırasıyla 0.14 ve 0.06V standart sapma (σ_0) değerleri ve 0.92 eV ve 0.43 eV ortalama engel yükseklikleri ile çift Gaussian dağılımı (DGD) ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak; $\ln\left(\frac{I_0}{T^2}\right) - (q\sigma_0)^2 / 2(kT)^2$ ile q/kT eğrisi düzeltilerek yine yüksek ve düşük sıcaklık bölgesi için (200-350K ve 80-170K) sırasıyla 0.91 eV ve 0.39 eV olmak üzere ortalama engel yüksekliği değerleri ile 8.14 A/cm²K² ve 2.00 A/cm²K² olmak üzere Richardson sabiti değerleri (A^*) elde edilmiştir. Elde edilen $A^*=8.14$ A/cm²K² Richardson sabiti değerinin GaAs için bilinen teorik 8.16 A/cm²K² değerine oldukça yakın bir değer elde edilmiştir. Ayrıca N_{ss} ' lerin enerjiye ($E_C - E_{ss}$) bağlı dağılım profilleri doğru beslem I-V ölçümlerinden, voltaja bağlı etkin potansiyel engel yüksekliği (Φ_e) dikkate alınarak elde edilmiştir. Sonuç olarak, diyodun sıcaklığa bağlı elektriksel özelliklerinin yalnızca N_{ss} ' e bağlı değil aynı zamanda R_s ' den de etkilendiği gözlenmiştir. Bu çalışmada, bu iki parametrenin hesaplanmasında özellikle doğru beslem koşulunun dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Yücedağ vd. (2014) çalışmasında üretilen Al/p-Si Schottky bariyer diyotta kobalt katkılanmış PVA arayüzeyin ve yüzey tuzaklarının (D_{it}) etkilerinin oda sıcaklığında elektrik ve dielektrik özelliklere etkisi incelenmiştir. Sırasıyla (30kHz-300kHz) frekans ve (-5V)-(6V) voltaj aralıklarında ters ve doğru beslem admittans ölçümleri gerçekleştirilerek dielektrik parametrelerin frekans ve voltaja bağlılıkları araştırılmıştır.

Yıldırım ve Gökçen (2014) çalışmasında ferroelektrik BTO arayüzey kullanılarak Au/n-Si yapıların; Au/n-Si MS ve Au/BTO/n-Si MFS fabrikasyonu ve admittans ölçümleri oda sıcaklığında 10kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde gerçekleştirilmiştir. MS ve MFS yapıların C-V ve G/ ω -V karakteristiklerinin ne sadece frekansa ne de sadece arayüzeyin özelliklerine bağlı olmadığı gözlenmiştir. Ayrıca yapıların R_s , BTO arayüzey üzerindeki etkileri de incelenmiştir.

Kaya vd. (2014) yaptığı çalışmada Au/PVC+TCNQ/*p*-Si yapısını üreterek ε' , ε'' , $\tan\delta$, M' , M'' , σ_{ac} oda sıcaklığında geniş bir frekans aralığında (1kHz- 5MHz) incelemiştir.

Azizian-Kalandaragh vd. (2014) çalışmalarında ardışık iyonik katman adsorbsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) metotunu kullanarak epitaksiyel büyütülen CdS-polimer nanoyapıları ince film olarak farklı yüzey morfolojileri ve parçacık büyüklüklerinde araştırmışlardır. Çalışmanın başlıca amacı oda sıcaklığında üretilen CdS polimer nanokompozitlerin (2, 6, 10) *ac* devirli SILAR metot ile (1kHz-1MHz) frekans aralığında empedans spektroskopisiyle dielektrik özelliklerinin ve σ_{ac} değerlerinin incelenmesidir.

Bilkan (2015) çalışmasında frekans ve voltaja bağlı C-V ve G/ω -V karakteristikleri Cr/*p*-Si MS Schottky bariyer diyotlar için sırasıyla (10kHz-5MHz) frekans ve ($\pm 4V$) voltaj aralıklarında ve oda sıcaklığında incelenmiştir. R_s ve N_{ss} 'nin, C-V ve G/ω -V karakteristiklerine etkileri de detaylı bir biçimde araştırılmıştır. C ve G' nin her ikisinin de frekans ve uygulama voltajının güçlü birer fonksiyonu olduğu bulunmuştur. Ayrıca, güçlü (NC) ve anormal pik davranışı her bir frekansta doğru beslem C-V eğrilerinden gözlenmiştir. Kapasitans davranışının tersi kondüktans değerlerinin de yığılım bölgesinde her bir frekansta hızlı biçimde arttığı görülmüştür. Schottky bariyer diyodun geniş NC davranışının R_s , N_{ss} ve doğal ya da katkılanmış arayüzey tabakasının varlığının bir sonucu olduğu görülmüştür. Doğru beslemdeki NC davranışını açıklayabilmek için C-I ve G/ω -I eğrileri aynı beslem voltajında çeşitli frekanslar için çizilmiştir. Doğru beslem voltajlarında artan frekansla C değerlerinin azaldığı görülmüştür. NC' lerdeki bu azalmanın G değerlerindeki artışa karşılık geldiği vurgulanmıştır. Aynı çalışmada Hill-Coleman metoduyla (1980) her bir frekans değerinde N_{ss} değerleri elde edilmiş olup 30kHz' de pik davranışı gözlenmiştir. Ayrıca voltaja bağlı R_s profilleri de Nicollian-Brews (1982) metodu kullanılarak elde edilmiştir.

Yücedağ vd. (2015) çalışmasında ise Al/ Co-doped (PVC+TCNQ)/*p*-Si yapının sıcaklık ve voltaja bağlı elektrik ve dielektrik karakteristikleri ve *ac* elektriksel

iletkenlikleri (200-360K) sıcaklık, (-4V)-(+9V) voltaj aralığında, 500kHz frekans değerinde detaylı biçimde incelenmiştir. ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$, M' , M'' ve σ_{ac} değeri özellikle tükenim ve yığılım bölgelerinde voltaja ve sıcaklığa bağlı elde edilmiştir.

Şafak Asar vd. (2015); (AuZn)/TiO₂/p-GaAs (110) Schottky engel diyotlarının dielektrik özellikleri ile *ac* elektriksel iletkenliklerini empedans spektroskopisi yöntemiyle oda sıcaklığında geniş frekans ve voltaj aralığında incelemişlerdir. ϵ' , ϵ'' , M' , M'' , $\tan\delta$ ve σ_{ac} değerlerinin özellikle tükenim ve yığılım bölgelerinde, uygulanan beslem voltajına ve frekansa duyarlı olduğunu göstermişlerdir. ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin artan frekans ile azalırken M' , M'' değerlerinin artan frekans ile arttığını belirtmişlerdir. Bu durumu, arayüzey durumlarına/tuzaklarına (N_{ss}), arayüzey dipol kutuplanmasına, R_s ve arayüzey tabakasına atfetmişlerdir. Bu parametrelerdeki değişimlerin düşük frekanslarda fazla oluşunu; arayüzey ve dipol kutuplanmasının kolayca oluşmasının kanıtı olarak göstermişlerdir. Arayüzeydeki yüklerinin çoğunun (TiO₂/p-GaAs) dış *ac* sinyalini kolayca takip edebileceğini ve böylece (AuZn)/TiO₂/p-GaAs (110) Schottky engel diyotlarının dielektrik özelliklerinin sapmasına katkıda bulunabileceğini ortaya koymuşlardır.

Çetinkaya vd. (2015) çalışmasında Au/(% graphene doped-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x)/n-Si yapıların dielektrik özellikleri 10kHz-2MHz frekans aralığında, oda sıcaklığında C-V ve G/ ω -V ölçümleri kullanılarak empedans spektroskopisi metoduyla incelenmiştir. Sonuçlar, ϵ' , ϵ'' , M' , M'' , $\tan\delta$ ve σ_{ac} parametrelerinin voltaj ve frekansın güçlü birer fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Negatif dielektrik sabiti davranışının düşük frekans, yeterince yüksek doğru beslem voltajlarında etkin olduğu gözlemlenmiştir. Bu davranış arayüzey polarizasyonuna, arayüzey yüklerine ve seri dirence atfedilmiştir. Yeterince yüksek beslem voltajlarında ϵ' değerinin artan frekansla azaldığı, ϵ'' nün arttığı görülmüştür. Arayüzey polarizasyonu ve arayüzey durumlarının her ikisi de düşük frekanslarda *ac* dış sinyalini kolayca takip edebildiği için ölçülen kapasitans ve iletkenliğe katkı sağlamıştır. ϵ'' nün negatif değeri ϵ''' nün maksimum değerine karşılık gelmiştir. ϵ' , ϵ'' nün bu şekilde görülen normal olmayan davranışları, arayüzey

tabakalı ve tabakasız metal-yarıiletken yapıların geleneksel davranışları ile karşılaştırılarak rapor edilmiştir. Bu çalışmanın deneysel sonuçları; çalışılan yapının dielektrik özelliklerinin frekans ve uygulama voltajına karşı çok hassas olduğunu göstermiştir. Arayüzey polarizasyonu ve arayüzey durumları nedeniyle özellikle düşük frekans ve yüksek voltaj değerlerinde bu hassasiyetin önemine özellikle dikkat çekilmiştir.

Sharma ve Tripathi (2016) çalışmalarında, Al/Al₂O₃/PVA: *n*-ZnSe MIS diyodunun frekansa bağlı C-V ve G/ω-V karakteristiklerine ait admittans ölçümlerini rapor etmişlerdir. MIS diyodun arayüzey durumlarının (N_{ss}) ve seri direncinin (R_s), C-V-*f* ve G/ω-V-*f* karakteristiklerini güçlü bir şekilde etkilediğini gözlemlemişlerdir. İletkenlik yöntemini; R_s, N_{ss}, yalıtkan arayüzeyin kapasitesi ve kalınlığının hesaplanması için kullanmışlardır. ε', ε'', tanδ ve σ_{ac} değerlerini, C-V ve G/ω-V eğrilerinde gözlemlenen frekans dağılımından elde etmişlerdir.

Shiwakoti vd. (2016), Ni/*n*-GaP Schottky diyotun dielektrik özelliklerini C-V ve G/ω-V ölçümleri ile 140K-300K sıcaklık aralığında incelemişlerdir. Sıcaklığın R_s ve N_{ss} üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. 1MHz frekans değerinde ε', ε'', M', M'' , tanδ ve σ_{ac} parametrelerinin sıcaklık bağımlılığını değerlendirmiş ve analiz etmişlerdir. ε', ε''' nün sıcaklığa bağlı özelliklerinin, sıcaklık ile artan çeşitli polarizasyon etkilerinin katkısını ortaya çıkardığı görülmüştür. σ_{ac}' nin Arrhenius grafiği, seçilen sıcaklık aralığında iki ayrı tuzak durumunun varlığını gösteren iki aktivasyon enerjisini göstermiştir. Bu çalışmada ayrıca lokalize arayüzey durumlarının etkisini incelemek için 1kHz-1MHz arasındaki C-*f* ölçümü gerçekleştirilmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Metal-Yarıiletken Kontakların Tarihsel Gelişimi

İnsanlık tarihi boyunca benzer özellik gösteren malzemeler çeşitli şekillerde sınıflandırılmışlardır. Olaya bilimsel açıdan bakıldığında bu sınıflandırmalardan en dikkat çekici olanı şüphesiz malzemelerin elektriksel yönden iletken olup olmamasıdır. Önceki bölümde de değinildiği gibi 19. yüzyılın başlarına kadar malzemeler elektriksel iletkenliğine göre iletken ve yalıtkan olarak ikiye ayrılmıştır. 1833’ de Michael Faraday’ ın gümüş sülfat numuneleri üzerine gerçekleştirdiği deneylerle elde ettiği sonuçlar bu sınıflandırmalarda değişikliğe gidilmesinin ilk adımı olmuştur. Faraday’ ın sıcaklığa bağlı direnç ölçümlerinin sonucunda, gümüş sülfatın direncinin iletken metallerin direncine ters, artan sıcaklıkla azaldığı görülmüştür. Bu gözlem Faraday’ ın doğada benzer özellikteki malzemelerin de var olduğuna dair inancını kuvvetlendirmiştir (Laeri vd., 2003). Sonraki yıllarda Johann Hittorf’ un gümüş ve bakır sülfat üzerine yaptığı geniş kapsamlı çalışma, Faraday’ ın gözlemlerini ve elde ettiği sonuçları destekler niteliktedir (Busch, 1989).

Metal-yarıiletken kontaklara dair bilgimiz ise bir asırdan daha öncelere, bakır ile demir sülfür gibi metal kontaklar ile yarıiletkenler arasındaki elektriksel iletkenliğin simetrik olmayan doğasını keşfeden Braun’ a (1874) kadar gider.

18. yüzyılın son çeyreğine girilirken Karl Ferdinand Braun metal oksitlerde iletkenlik ve doğrultma özelliklerini gözlemlemiştir. Braun’ un yaptığı çalışma MS yapılar üzerine ilk çalışma olması nedeniyle dikkat çekicidir. Öyle ki, ilk yıllarda değeri pek anlaşılamamış olan bu keşif Braun’ a 1909 yılında Nobel ödülünü kazandırmıştır.

Doğrultma mekanizması anlaşılmadığı halde, metal noktalarla metal sülfürler arasındaki kontaklar, radyolar üzerine ilk deneylerde dedektör olarak yaygın şekilde kullanılmaktaydı. Bunlardan Lodge’ nin dalga alıcısının daha çok oksit

filmlerle ayrılmış metal parçacıklarının iletkenlik özellikleri üzerindeki etkisine dayanmış olduğu görülmektedir.

Bu gelişmelerden sonra malzemeler genelde öz iletkenlik (σ) ve ya öz dirençlerine ($\rho = 1/\sigma$) göre iletken, yarıiletken ve yalıtkan olmak üzere üç ana gruba ayrılmıştır. 1884' de Charles Fritts, metal plaka ve çok ince altın tabaka ile kaplanmış ince selenyumdan oluşan ilk güneş pilini elde etmiştir (Perlin, 2002) Ayrıca 1906 yılında Pickard, silisyum kullanarak metal-yarıiletken kristal dedektörler için patente layık görülmüştür. 1907' ye gelindiğinde ise Henry Joseph Raund, karborandum kristaline gerilim uygulayarak sarımsı bir renk yaymasını sağlayıp ilk ışık yayan diyodu (LED) elde etmiştir (Round, 1907). Yine aynı yıl Pierce, farklı yarıiletkenler üzerine metal püskürterek oluşturduğu doğrultucu metal kontaklarla hazırladığı diyotların doğrultma özelliğini yayınladı (Rhoderick ve Williams, 1988). İkinci dünya savaşı sırasında ise nokta kontak ve doğrultucular mikrodalgalarda ve frekans dönüştürücülerde kullanılmıştır.

1920' lerde radyo yayınlarındaki hızlı gelişme, daha çok bir tungsten noktanın bir kristalle (genellikle kurşun sülfürle) yaptığı kontakta meydana gelen 'kedi bıyığı' doğrultucuları sayesinde olmuştur. İlk bakır oksit levha doğrultucular hemen hemen aynı dönemlerde ortaya çıkmıştır (Grondhal, 1926a, b).

Bir yarıiletken yüzeyi üzerine metalik telin kontak edilmesiyle üretilen nokta kontak diyotlar, kablosuz telgrafın ilk günlerinde radyo dalgası dedektörü olarak kullanılmaya başlanmıştır. Ancak bu kontakların yerini 1920' lerde geliştirilen vakum diyotlar almıştır. Nokta kontak diyotlar, frekans dönüştürücü ve düşük seviye mikrodalga dedektörü olarak kullanılabilmesinden dolayı ikinci dünya savaşı yıllarında önem kazanmıştır. Daha sonra nokta kontak doğrultucularının güvenilirliğinin yeterli olmadığı anlaşıncı bunların yerini yarıiletken yüzey üzerine ince metalik filmlerin kaplanması ile elde edilen doğrultucular almaya başlamıştır. Bu yapılar çok daha iyi elektriksel karakteristikler sergilediğinden, metal-yarıiletken kontaklar üzerine yürütülen çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. MS kontakların doğrultucu özellik sergilemesi,

diyodun doğru beslemde akımı rahatlıkla iletmesi, ters beslemde ise hemen hemen hiç akım iletmemesi ile defa Schottky ve arkadaşları Schottky, Stömer ve Waibe (1931) tarafından gözlemlendi. Bu özellik metal ile yarıiletken arasında oluşan potansiyel engel yüksekliğine atfedildi (Schottky, 1931; Schottky, 1938; Mott, 1938; Bethe, 1942; Sharma, 1984; Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Kwok, 2007; Neamen, 1997). O yıllarda, diyot boyunca bir akım oluşursa, potansiyel düşüşünün hemen hemen tümüyle kontakta meydana geleceği, o nedenle de bir çeşit potansiyel engelinin oluşacağı öngörülmüştür. O zamana kadar kuantum mekaniği sağlam bir şekilde inşa edildiğinden 1932' de Wilson ve ekibi, doğrultma işleminin elektronların engelden kuantum mekaniksel tünellenmesi ile açıklanabileceğini ortaya koymuştur. Fakat kısa bir süre sonra bu mekanizmanın kolay akım akış yönünü yanlış yönde ön gördüğünün farkına varılmıştır.

MS kontakların anlaşılmasında en önemli gelişme, ikinci dünya savaşı sırasında mikrodalga radarlarda silisyum ve germaniyum nokta kontak doğrultucularının kullanılmasının bir sonucu olarak meydana gelmiştir. Ancak nokta kontak doğrultucularının karakteristiklerinin oldukça güvenilir olmadığı kanıtlanınca bu doğrultucuların yerini uygun şekilde hazırlanan yarıiletken yüzey üzerine ince metalik film kaplanmasıyla elde edilen doğrultucular almıştır. Bu kontaklar çok daha iyi karakteristikler sergilemiştir ve bugünkü metal-yarıiletken kontaklara dair bilğimiz bu tarz cihazlar üzerine yürütülen çalışmalardan elde edilmiştir. Bu sürece belki de en önemli katkı Bethe (1942)' nin termioyonik emisyon teorisidir (Sze ve Kwok 2007; Sharma,1984). Bu teoriye göre akım, Mott ve Schottky' nin savundukları gibi yarıiletkende sürüklenme ve difüzyondan ziyade, elektronların metale emisyon süreci ile belirlenmiştir. 1920' li yıllarda radyo dalgalarının algılanmasında vakum tüpleri kullanılmıştır.

Metal ile yarıiletken kontak edildiğinde zamanla metal ile yarıiletken arayüzeyinde oksitlenme dediğimiz ara yüzey oluşmaktadır. Bu arayüzeyin oluşum etkileri 1930' lu yıllarda incelenmeye başlanmıştır. 1938' de Schottky ve Mott metal ile yarıiletkenin ara yüzeyinde oluşan potansiyel engeli ile ilgili teoriler üretmeye başlamışlardır (Cowley ve Sze, 1965; Sze, 1981; Sharma,

1984). Deneyisel açıdan MS yapılarda bariyerin varlığını ortaya koyan Walter Schottky (1938) bu ve benzeri yapılar üzerine yaptığı birçok çalışmayla literatüre bu alanda önemli ölçüde katkı sağlamıştır.

1945' den sonra, MS kontaklar üzerindeki çalışmaları nokta kontak transistörlerinin icadına kadar götüren yarıiletken fiziği, yoğun faaliyetlerle harekete geçirilmiştir ve dikkatler büyük ölçüde azınlık taşıyıcıların enjeksiyonu ile nokta kontaklar üzerine odaklanmıştır. Sonraları nokta kontak transistörlerinin sona ermesiyle de ilgi çok daha geniş alanlı kontaklara yönelmiştir.

Yüksek vakum sisteminde metal filmlerin buharlaştırılmasının nokta kontaklardan çok daha kararlı ve yeniden üretilebilir kontakların oluşumunun gerçekleştirilmesi, 1950 ve 1960' larda bu konuda büyük bir atılım başlatmıştır ve bu konudaki mevcut kapsamlı bilgilerimizin temelini oluşturmuştur. Bu çalışmalar, yarıiletken teknolojisinde kontakların önemini ortaya koymuştur. Başlıcaları, Bardeen (1947), Goodman ve Sze' nin teorik çalışmaları ile Goodman ve Cowley' in deneyisel çalışmalarıdır (Cowley ve Sze, 1965; Padovani ve Sumner, 1965; Sharma, 1984; Sze ve Kwok, 2007; Padovani, 1966; Özavcı vd., 2013; Saxena, 1969).

1960' dan sonra ise Schottky engel diyotları üzerine çalışmalar yoğunluk kazanmıştır. Bu tarihlerde metal-yarıiletken tabanlı güneş pilleri üzerine ilk çalışmalar başlamıştır. Böylece Schottky engel diyotların uygulama alanları genişlemiştir. 1970 lerden sonra bu çalışmalar iki yöne kaymaya başlamıştır. Birincisi Schottky engel diyotları üzerindeki araştırmaların daha çok endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaya başlanması, ikincisi ise M/S arayüzeyinin tam olarak anlaşılabilmesidir. Bu çalışmalar günümüzde özellikle yapıların çeşitlendirilmesi, performanslarının artırılması ve özellikle yüksek frekans, düşük sıcaklıkta aygıt performansı ile optoelektronik özelliklerin detaylandırılması üzerine halen devam etmektedir. Bu nedenledir ki birçok kaynakta ve alanda Schottky adı sıklıkla geçmektedir. Schottky' nin MS yapılar ve bariyer yüksekliği ile ilgili öncü çalışmalar yürütmesi sebebiyle günümüzde dahi

benzeri çalışmalar Schottky bariyer diyodu olarak anılmakta, ciddi anlamda ilk öneri W. Schottky tarafından yapıldığı için de ona atfen 'Schottky engel diyotlar' olarak bilinmektedir. Metal ile yarıiletken kontak edildiğinde ara yüzey yüklerinin ayrışmasından dolayı potansiyel engel oluşumunun ilk detaylı çalışması Schottky ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir (Cowley ve Sze, 1965). Daha sonra ise Schottky ve Mott engelin oluşum mekanizması ve engelin yüksekliğinin hesaplanması hakkında eş zamanlı çeşitli modeller önermişlerdir (Cowley ve Sze, 1965; Sze, 1981; Sharma, 1984). Schottky-Mott teorisine göre, metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonları (Φ_m, Φ_s) arasındaki farktan dolayı bir potansiyel engeli ortaya çıkmaktadır (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Kwok, 2007; Sharma, 1984). Ancak sonraki çalışmalar bu teorinin tümüyle doğru olmadığını kanıtlamıştır. Çünkü bu teori metal/yarıiletken arayüzeyindeki tabakanın varlığını dikkate almamaktadır. Tabaka kalınlığı ve tabakanın kimyasal yapısı kontağın hazırlanma şartlarına göre değişmektedir. Bu tabaka çok ince dahi olsa içinde bulunan iyonlar ve oluşacak ara yüzey durumları yarıiletkene ait Fermi seviyesinin yasak enerji aralığındaki hareketini sınırlamaktadır. Yani Schottky-Mott teorisi yalnızca ideal durumlar için geçerlidir. Daha sonra Schottky, (1938) ve Mott, (1938) engel oluşumunun mekanizmasını birbirinden bağımsız olarak açıkladılar ve engel yüksekliğinin biçimini hesaplamaya yönelik modeller önerdiler. Doğrultmanın gözlenen yönünün elektronların normal sürüklenme ve difüzyon işlemleriyle bir potansiyel engelini aştığını farz ederek açıklanabileceğine dikkat çektiler. Mott (1938)' a göre, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki farktan dolayı bir potansiyel engeli ortaya çıkmıştır. Mott, elektrik alanının sabit olduğunu, dolayısıyla elektrostatik potansiyel metale yaklaşırken uzaklıkla lineer olarak değişecek şekilde engel bölgesinin yüklü safsızlıklardan arındırılmış olduğunu varsaymıştır. Schottky (1939), bunun aksine engel bölgesinin yüklü sabit bir safsızlık yoğunluğu içerdiğini ve buna bağlı Poisson denklemine göre metale yaklaşırken, elektrik alanının doğrusal; elektrostatik potansiyelin ise ikinci dereceden arttığını kabul etmiştir.

Daha sonra Cowley ve Sze (1965) ara yüzey tabakası ile ilgili ilk çalışmaları gerçekleştirmişler ve farklı metaller için M/S arayüzeyinde oluşan engelleri

incelemişlerdir. Potansiyel engelin biçiminin belirlenmesinde, uzay yükünün rolü hakkındaki benzer düşünceler Sovyetler Birliğinde Davydov (1939-1941) tarafından geliştirilmiştir (Rhoderick ve Williams, 1988). Çalışmalar sonucunda metalden yarıiletken veya yarıiletkenden metale doğru görülen engelin yüksekliği metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının yanı sıra ara yüzey tabakasının varlığına ve kalınlığına, ara yüzey tuzaklarının yoğunluğuna, sıcaklık ve uygulama voltajı gibi birçok nedene bağlı olduğu görülmüştür (Rhoderick ve Williams, 1988). İlk çalışmalardan bugüne kadar yaklaşık bir asırlık süre geçmesine, birçok deneysel ve teorik çalışma yürütülmesine rağmen bugün bile MS yapılar ve bu yapıların daha gelişmiş biçimleri hakkında bilinenler yeterli değildir. Bunun başlıca sebebi, yapılan elektrisel karakterizasyonun çalışma koşulları olan; sıcaklık, frekans, radyasyon v.b. koşulların değişiklik göstermesidir. Bu yapıların araştırılmasına yönelik ilk çalışmalar Schottky, Strömer ve Waibel (1931)' in bariyer oluşumuna yönelik yaptığı yayınlar olmuştur. Bu çalışmanın da konusu olan MIS yapılar ise ilk olarak 1959' da birbirinden bağımsız olarak John Luis Moll-William Gardner Pfann ve J. Geoffrey-B. Garret tarafından voltaj kontrollü varistör (değişken kapasitör) olarak kullanılmasıyla literatürde yer almaya başlamıştır Daha sonra karakteristik özellikleri Frankl ve Linder tarafından incelenmiştir (Moll, 1959; Pfann ve Garret, 1959). İlk başarılı MIS yapısı 1960' larda Ligenza ve Spitzer tarafından Si yüzeyine termal yolla SiO₂ büyütülmesidir (Sharma, 1984). MIS yapıların ilk kez Schottky bariyer diyodu olarak literatürde yer alması ise Lewis M. Terman ile K Lehovec, A. Slobodskoy ve J. L. Sprague' nin SiO₂-Si üzerine yapmış olduğu çalışmalar sayesinde gerçekleşmiştir (Terman, 1962; Lehovec, vd., 1963).

Son otuz yıldır Schottky engellere dayalı bileşenler, mikroelektronikte artarak kullanılmaya devam etmektedir. Engel oluşumu ve metal yarıiletken arayüzeylerinden akımın taşınması fiziğinin tam olarak anlaşılması amacıyla araştırma faaliyetleri devam etmektedir (Hudait vd., 2001; Özdemir, 2002; Bengi vd., 2007; Zeyrek vd., 2006; Horvard, 1988; Özdemir vd., 2006; Aldemir, 2013; Werner ve Gütter, 1991; Leroy vd., 2005). Eldeki mevcut teknikler, metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeylerde ayrıntılı mikroskobik etkileşimleri

araştırmayı içerecek şekilde gelişmiştir. Buna paralel olarak katıların ve bunların arasındaki sınırların elektronik özelliklerinin belirlenmesinde teorik metotlar da geliştirilmiştir. Yük taşınımı/akım iletim mekanizmalarının analizindeki bilgisayarlar artan hızla kullanılmaktadır.

MIS yapılar, metal ile yarıiletken arasına yalıtkan bir tabaka içerdiğinden dolayı kapasitöre benzemektedir. Bu yapılar da ilk olarak 1959 yılında J. L. Moll tarafından deneylerini de içeren çok sayıda makaleler yayınlanarak oluşturulmuştur (Moll, 1959; Berger, 1997; Hahn vd., 1989). Bu yapı ince yalıtkan filmlerin ve yarıiletken yüzeylerin elektriksel özelliklerini incelemede oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Terman, 1962). Söz konusu yapı, termal olarak oksitlenmiş yarıiletken silisyum kristali üzerinde bir alüminyum metal elektrottan oluşmuştur. Daha sonra Terman, MIS kapasitörün, yalıtkan/silisyum arayüzeyinde bağ durumlarının özelliklerini araştırmıştır (Grove vd., 1965). Terman, MIS kapasitöre *ac* gerilim uygulayarak kapasitansın frekansa bağlılığını ölçmüştür. Deneysel C-V ile teorik C-V verilerini karşılaştırmıştır. Daha sonra termal olarak oksitlenmiş silisyumun ara yüzey tuzaklarının, elektron ve deşik tuzaklarının zaman sabitlerini elde etmiştir. Terman, yüksek frekans C-V (C_H -V) verilerinin, ara yüzey tuzaklarının toplam yoğunluğunu verdiğini göstermiştir. 1970' lerden beri transistörlerdeki devrelerin üretim yöntemlerinde kullanılmakta olan bu metot H_F -V metodu/Terman metodu ya da Terman-Moll metodu olarak bilinmektedir. Transistörlerde çalışılmak üzere kullanılan MOS kapasitörün C-V verilerinin ilk detaylı gösterimi ve okside edilmiş silisyum yüzeyleri üzerinde oksit büyütülmesi ise Grove, Deal, Snow ve Sah tarafından verilmiştir (Grove vd., 1965).

Sonuç olarak MS, MOS, MIS/ MPS/ MFS veya benzeri yapılar Schottky bariyer diyotların teknolojisinde pekçok alanda kullanılan elektronik cihazların temel parçaları olduğu için ilk keşiflerinden bugüne kadar uzun zaman geçse de halen güncelliğini korumakta ve araştırmacıların ilgisini çekmektedir.

3.2 Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklar

MS kontakların elektriksel ve dielektrik özelliklerinin anlaşılabilmesi için yalıtkan ve yarıiletken özelliklerinin incelenmesi gerekir. MS kontakların iletkenlik özelliklerinin incelenebilmesi de uygun kontakların uygulanabilmesi ile mümkün olur. Burada yarıiletken ile kontak edilecek metalin veya alaşımın mümkün olduğunca düşük dirençle atomik boyutlarda teması gerekir. Oluşturulan kantağın özelliklerinin ideale yakın olabilmesi için kontak malzemelerinin yüzeyleri mümkün olduğunca temiz ve pürüzsüz olmalıdır (Taşçıoğlu, 2012). Oluşacak diyodun doğrultma özelliğinin iyi olabilmesi için kullanılan saf metallere en uygun olanın seçilmesi büyük önem taşır. Kontak problemleri analiz edilirken belli başlı tanımlardan yararlanılmaktadır. Bu tanımlar kısaca şöyle özetlenebilir;

- ✓ Vakum seviyesi: Bir elektronu serbest hale getirebilmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarı ya da başka bir deyişle bir metalin dışında kinetik enerjisi sıfır olan elektronunun enerji seviyesi olarak tanımlanır.
- ✓ Fermi enerjisi (E_F): İletkenlerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0^0K$), taban durumundan itibaren elektronlar tarafından işgal edilen en yüksekteki dolu seviyenin enerjisidir. Yalıtkanlarda ise iletkenlik ve valans bandındaki taşıyıcı sayısına ve sıcaklığa bağlı olarak yasak enerji bölgesinde yer alan izafi seviyedir. N -tipi yarıiletkenlerde iletim bandından itibaren ölçülürken, p -tipi yarıiletkenlerde valans bandından itibaren ölçülür. Yarıiletkenlerde E_F , katkı atomlarının yoğunluğuna ve sıcaklığa bağlı olarak değişen bir niceliktir. N tipi yarıiletkenlerde E_F enerjisi iletkenlik bandı (E_C) referans alınarak tanımlanır ($E_F=kT/q\ln(N_C/N_D)$). P -tipinde ise valans (değerlik) bandı (E_V) referans alınarak tanımlanır ($E_F=kT/q\ln(N_V/N_A)$). Dolayısıyla E_F enerjisi aynı zamanda valans ve iletkenlik bandındaki izinli durumların yoğunluğuna da (N_C, N_D) bağlı olmaktadır.
- ✓ İş fonksiyonu (Φ): Bir elektronu fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan minimum enerji miktarıdır. Fermi

enerjisi, katkılanan maddenin atomlarının yoğunluğu ile değiştiğinden iş fonksiyonu da değişken bir niceliktir. Örneğin metalin iş fonksiyonu (Φ_m), kristal örgünün periyodik potansiyeli nedeniyle hacim katkısına ve yüzeydeki dipol katmanı nedeniyle de yüzey katkısına sahiptir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s ise metale benzer şekilde tanımlanır ve yarıiletkenin fermi seviyesinin katkılama göre değişiklik göstermesi nedeniyle değişken bir niceliktir.

- ✓ Elektron ilgisi/yakınlığı (afinitesi) (χ): Katkılama bağı olmayan bir diğer önemli yüzey parametresidir. Vakum seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki fark olarak tanımlanır.
- ✓ E_F , Φ_m , Φ_s ve χ birimleri genellikle (eV) cinsinden verilir.

Tüm yarıiletken tabanlı devre elemanlarının temelini genelde MS ve MIS tipi kontaklar teşkil eder. Bir metal ile bir yarıiletken iki tip kontak oluşturabilir. Bunlardan biri Schottky kontak olarak bilinen, lineer olmayan doğrultucu akım-gerilim karakteristiğine sahip olan kontak tipi, diğeri ohmik kontak olarak adlandırılan, lineer akım-gerilim karakteristiğine sahip doğrultucu olmayan kontak tipidir.

Bir metal ile bir yarıiletken sıkı kontak edilip sırasıyla doğrultucu ve ohmik kontaklar oluşturulduğunda, önceden de bahsedildiği gibi öncü çalışmalarından dolayı yapıya genel adıyla Schottky engel diyotları (SBDs) denilmektedir (Rhoderick ve Williams, 1988). Schottky diyotların karakteristik parametrelerinin iyi anlaşılabilmesi için yalıtkan ve yarıiletken kristallerinin iletkenlik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir. Bunun yollarından biri kristale uygun kontakların uygulanmasıdır.

Bir metal ile bir yarıiletken kontak edildiğinde, seçilen metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları oluşan kontağın doğrultucu (Schottky) veya ohmik olduğunu belirler. Başka bir ifadeyle MS kontaklar, diğeri adıyla Schottky bariyer diyotlar oluşturulurken uygun iş fonksiyonlu metal ve yarıiletken seçimine dikkat edilmelidir.

Schottky-Mott modeline göre oluşan kontağın ohmik ya da doğrultucu oluşunu seçilen metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki durum belirler. Oluşabilecek durumlarla ilgili ayrıntılı bilgi Çizelge 3.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge3.1. İş fonksiyonlarına göre doğrultucu ve ohmik kontakların oluşumu

İş fonsiyonları	Yarıiletkenin türü	Kontakların türü
$\Phi_m > \Phi_s$	<i>n</i> -tipi	doğrultucu
$\Phi_m < \Phi_s$	<i>n</i> -tipi	ohmik
$\Phi_m > \Phi_s$	<i>p</i> -tipi	ohmik
$\Phi_m < \Phi_s$	<i>p</i> -tipi	doğrultucu

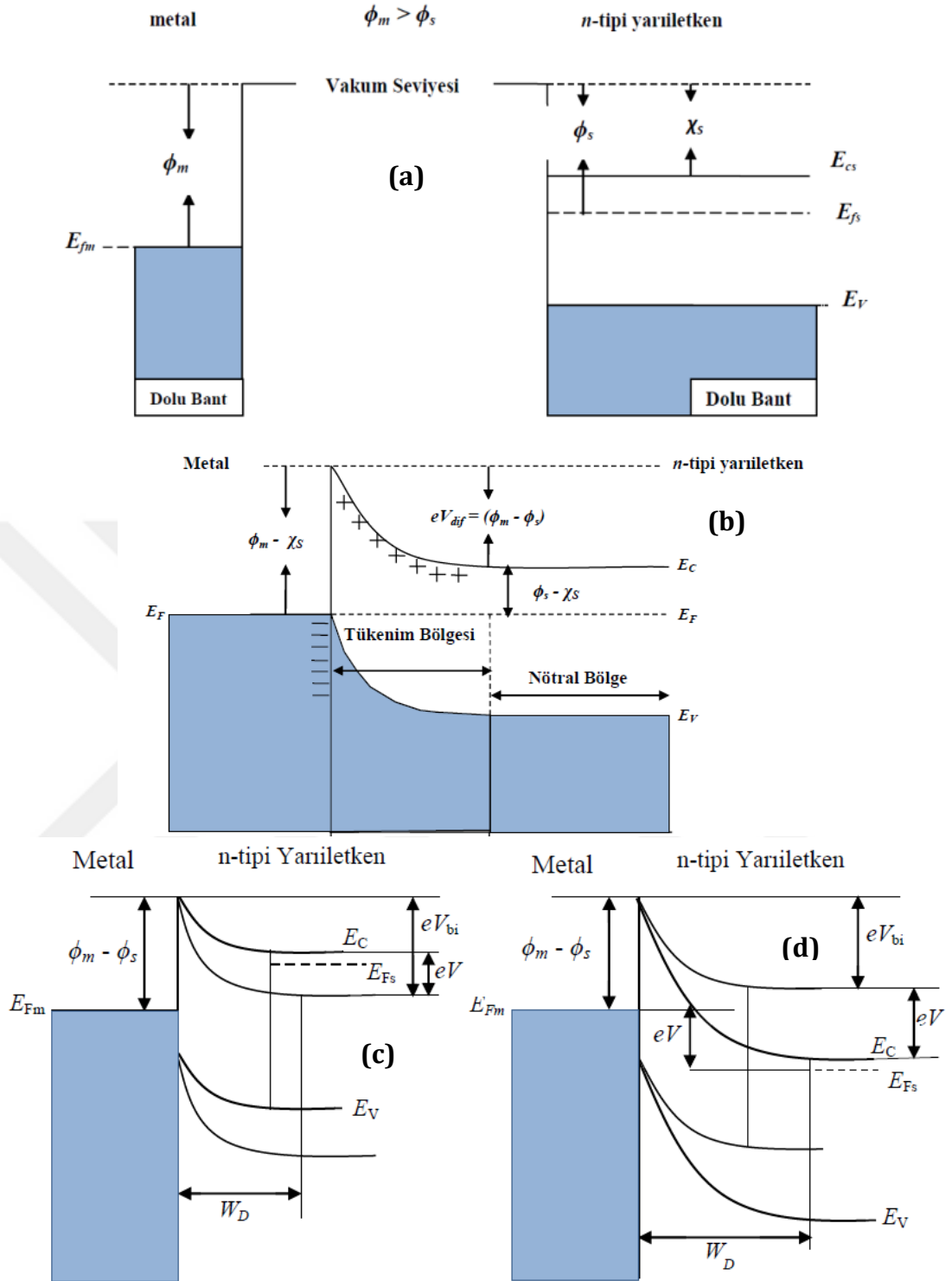
Bir MS diyot arka ohmik, ön doğrultucu kontakta oluşmaktadır. Her iki tip için yarıiletkenin arka mat olan yüzüne büyütülen saf metalin uygun bir sıcaklıkta yarıiletkenin içerisine çöktürülmesi, düşük dirençli ohmik kontak oluşturulması açısından son derece önemlidir.

3.2.1. Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Bu kontak tipinde başlangıçta birbirinden ayrı durumda $\Phi_m > \Phi_s$ şartını sağlayan bir metal ile yarıiletken kontak edildiğinde Şekil 3.1 (a), iki malzeme için de ortak bir termodinamik denge durumu oluşuncaya kadar iş fonksiyonu küçük olandan iş fonksiyonu büyük olana doğru, burada yarıiletkenden metale bir elektron geçişi olur. Elektronların geçişi nedeniyle yarıiletken sınırının yakınındaki bölgede serbest elektron yoğunluğunda bir azalma meydana gelir. Termodinamik dengedeki E_F değeri, yarıiletken boyunca sabit kalacağından iletkenlik bandıyla valans bandı eğilir (Şekil 3.1 (b)). Elektronlar yarıiletkenden metale geçerken arkalarında pozitif yükler (holler) bırakır. Bu bölgede bu pozitif yükler tükenim tabakası kalınlığı (W_D) kadar yayılarak pozitif bir yük bölgesi oluştururlar. Metal tarafına geçen elektronlar ise ince bir negatif bölge oluşturur. Negatif ve pozitif yüklerden meydana gelen bölge ara yüzeyden Thomas-Fermi film mesafesi ($\sim 0.5\text{\AA}$) kadar uzakta oluşur. Pozitif ve negatif yük bölgeleri arasında da bir iç elektrik alan meydana gelmektedir. Bu alanın yönü pozitif bölgeden negatif bölgeye yani yarıiletkenden metale doğrudur. Şekil 3.1

(b)' de gösterilen enerji band diyagramında görüldüğü gibi kontak yapıldıktan sonra yarıiletkenin yasak enerji aralığı (E_g), metalin iş fonksiyonu (Φ_m) ve yarıiletkenin elektron ilgisi (χ_s) değerleri sabit kalmaktadır. E_g sabit kalacağından (E_V) ile (E_C) bantları birbirine paralel olarak hareket edecek, ayrıca χ_s sabit kalacağından sürekliliği korumak amacıyla geçiş bölgesinde yarıiletkendeki vakum seviyesi aşamalı bir şekilde metaldeki vakum seviyesine yaklaşacaktır. Tüm seviyelerin bükülme miktarı iş fonksiyonları arasındaki fark kadardır.





Şekil 3.1. Metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda;
a) metal ile yarıiletkenin kontak oluşmadan önceki enerji bant diyagramı,
b) kontak oluştuktan sonraki termal denge durumu, c) metal/*n*-tipi yarıiletken-doğrultucu kontağın pozitif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı,
d) metal/*n*-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın negatif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı

$$qV_{bi} = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (3.1)$$

Bantlardaki bükülmenin büyüklüğü, iki iş fonksiyonu arasındaki farka eşittir. Burada V_{bi} eklemnin volt cinsinden verilen kurulum/kurulma (built in potential) olarak bilinen kontak potansiyel farkıdır. Yani Eşitlik (3.1)' deki qV_{bi} miktarı, elektronların yarıiletkeniden metale geçmebilmesi için sahip olması gereken enerji miktarı ya da karşılaşılan potansiyel engel yüksekliğidir.

Yalnız burada yarıiletken tarafından görülen engel yüksekliği ile metal tarafından görülen engel yüksekliği birbirinden farklıdır. Şekil 3.1 (b)' de görülebileceği gibi şu eşitliklerle tanımlanır.

$$\Phi_b = (\Phi_m - \chi_s) \quad (3.2)$$

$$\Phi_s = \chi_s + \Phi_n \quad (3.3a)$$

$$\Phi_m = qV_{bi} + \Phi_s \quad (3.3b)$$

Eşitlik (3.2), Eşitlik (3.3a) ve (3.3b) ifadelerine göre yeniden düzenlenecek olursa engel yüksekliği için aşağıdaki ifade elde edilir;

$$\Phi_b = qV_{bi} + \Phi_n \quad (3.4)$$

Burada $\Phi_n = E_C - E_F'$ ye eşdeğer olup, ($q=e$) elektronik yüküdür. Ancak n -tipi yarıiletkenlerde E_F değeri, E_C referans alınarak belirlendiği için $\Phi_n = |E_C - E_F| = E_F$ alınır. Bu ifade Schottky yaklaşımı ya da Schottky limiti olarak bilinir. Ancak Eşitlik (3.4), Φ_m ve Φ_s ' deki yüzey dipol katkılarının metalin yarıiletkenle kontak edilmesinden sonra değişmediği varsayımına dayanmaktadır. Genelde Φ_b potansiyeli termal enerji ($= kT/q$) değerinden oldukça büyüktür. Bu sebepten iletkenlik bant elektronlarının çok az bir kısmı bu engeli aşabilecek kadar enerjiye sahiptir. Yeterli enerjiye sahip bu elektronlar yarıiletkeniden metale akarak akıma neden olurlar. Bu akım, termal dengeye gelinceye kadar akmaya devam eder. Yarıiletkenin uzay yükü bölgesi çok az hareketli taşıyıcı içeren yüksek dirençli (yalıtkan) bir tükenim bölgesi

haline dönüşür. Bu durumda engelin şekli yarıiletkendeki verici (donor) katkı atomlarının yoğunluğundan elde edilir. Schottky (1938), metal arayüzeyine doğru yarıiletkenin düzgün bir biçimde katkılандığı varsayımından hareketle tükenim bölgesinin düzgün yük yoğunluğuna sahip olduğunu söyler. Bu sabit uzay yükü için elektrik alan kuvveti uzay yük tabakasının sınırından itibaren uzaklıkla lineer olarak artar ve oluşan parabolik engel ilk çalışan bilim adamına atfen ‘Schottky engeli’ olarak bilinir. Mott (1938) ise bu tabakayı metal ile yarıiletken arasında düzgün olarak katkılanmış (sandviçleşmiş) bir ince tabaka/bölge olarak tanımlar. Bu ince tabakadaki elektrik alan kuvveti sabit ve potansiyel bölge boyunca lineer olarak artar. Bu tip engel, yine ilk çalışan bilim adamına atfen ‘Mott engeli’ olarak bilinir. Mott engeli neredeyse intrinstik/saf yarıiletken gibi az katkılı ince bir tabakanın metal ile yüksek katkılı yarıiletken arasına konulmasıyla ortaya çıkar.

Termal denge durumunda oluşan bu akım metalden yarıiletkene doğru akan eşit büyüklükteki akımla dengelenir. Net akım sıfır olur. Yarıiletkenin tükenim bölgesinin direnci metal ve yarıiletkenin nötr kısımlarının direncine göre çok büyüktür, dolayısıyla iletkenliği azdır. Uygulanan pozitif veya negatif voltajın neredeyse tamamına yakını bu bölgeye düşer ve denge durumunda enerji-bant yapısında değişikliğe neden olur. Diyota pozitif voltaj (V_F) uygulandığında Şekil 3.1 (c)’ de gösterildiği gibi bataryanın pozitif tarafı metale negatif tarafı da yarıiletkene bağlanarak dengeye ulaşıldığı zaman oluşan iç elektrik alana zıt yönde bir alan meydana gelir. Bu alanın etkisiyle tükenim tabakasının genişliği azalır. E_F seviyesi uygulanan voltaj kadar yukarı çıkacağı için yarıiletken tarafından görülen engel yüksekliği V_{bi} ’ den $(V_{bi} - V_F)$ ’ ye düşer. Metalden yarıiletkene doğru olan akımda bir değişiklik olmazken yarıiletkenden metal tarafına geçen elektron sayısında, dolayısıyla da akımda artış olur. Yarıiletkenden metale doğru V potansiyeliyle üstel olarak artan net bir I_{net} akımı oluşur. Bu akım;

$$I_{net} = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.5a)$$

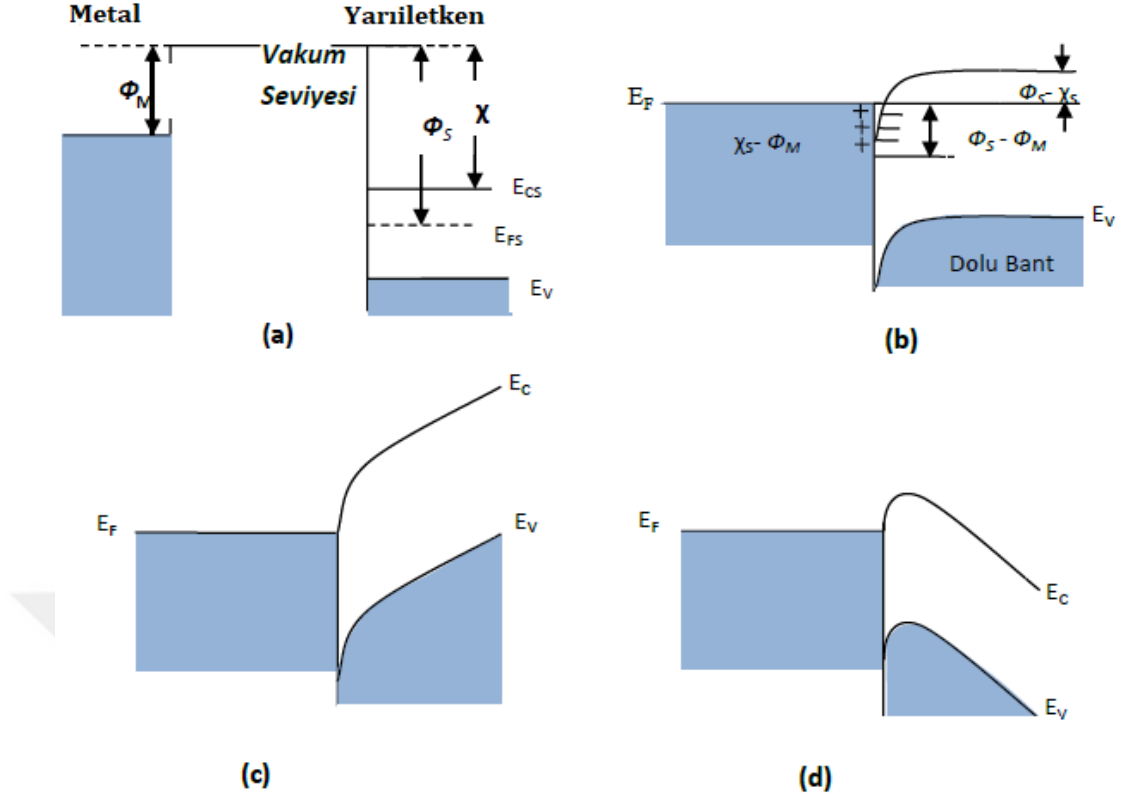
ile verilir. Burada k Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık ifadesidir. I_0 (I_s) diyodun doyma akımı olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I_0 = AA^* \exp\left(-\frac{q\Phi_{bo}}{kT}\right) \quad (3.5b)$$

Eşitlikteki A diyodun alanı, A^* etkin Richardson sabiti ve Φ_{bo} M/S arasında oluşan sıfır beslem engel yüksekliğidir. Diyota negatif voltaj (V_R) uygulandığı zaman yani Şekil 3.1 (d)' de gösterildiği gibi bataryanın pozitif tarafı yarıiletkenle negatif tarafı da metale bağlandığında denge durumunda oluşan iç elektrik alan ile aynı yönde bir alan oluşur ve bunun etkisiyle tükenim tabakasının genişliği artar. E_F seviyesi uygulanan voltaj kadar aşağı iner ve yarıiletken tarafında görülen engel yüksekliği V_{bi} ' den $(V_{bi} + V_R)$ ' ye çıkar. Metalden yarıiletkenle doğru olan akımda bir değişiklik olmazken yarıiletkenden metal tarafına geçen elektron sayısında, dolayısıyla da akımda azalma meydana gelir. Metalden yarıiletkenle doğru küçük bir sızıntı akımı oluşur. Böylece metal-yarıiletken doğrultucu kontak özelliği gözlenmiş olur (Sze, 1981; Tyagi, 1991).

3.2.2. Metal/ n -tipi yarıiletken ohmik kontaklar

Metal ve yarıiletken kontak edildiğinde eğer yarıiletkenin iş fonksiyonu metalin iş fonksiyonundan büyük ise ($\Phi_s > \Phi_m$) ohmik kontaklar oluşur. Yani termal denge durumundan sonra dışarıdan uygulanacak pozitif veya negatif voltaj fark etmeksizin her durumda akım iletimine neden olacaktır. Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalinkinden büyük olduğu durum için metal- n tipi yarıiletkenin kontak oluşmadan önceki enerji-bant diyagramı Şekil 3.2 (a)' da gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Metal/*n*-tipi yarıiletken ohmik kontağın $\Phi_S > \Phi_M$ durumunda a) Metal ile yarıiletkenin kontak oluşmadan önceki enerji bant diyagramı, b) Kontak oluşuktan sonraki termal denge durumu, c) Metal/*n*-tipi yarıiletken ohmik kontağın pozitif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı, d) Metal/*n*-tipi yarıiletken ohmik kontağın negatif uygulama voltajı altındaki enerji-bant diyagramı

Eklem oluşuktan sonra, termal dengeye ulaşıncaya kadar elektronlar metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına geçerken geride pozitif yükler (boşluklar/holler) bırakırlar. Denge sağlandığında yarıiletkenin Fermi seviyesi Şekil.3.2 (b)' de görüldüğü gibi, $\Phi_S - \Phi_m$ değeri kadar yukarı yönelir. Metaldeki elektron yoğunluğu çok fazla olduğu için, metaldeki pozitif yükler metal-yarıiletken ara yüzeyinde yüzey yük tabakası oluştururlar. Yarıiletkende tükenim bölgesi oluşmaz. Bu nedenle yarıiletkenden metale ya da metalden yarıiletkene geçen elektronlar için herhangi bir potansiyel engeli söz konusu değildir. Elektron yoğunluğu ara yüzey kenarında artar ve sistemin en büyük öz direnci yarıiletkenin yapısından kaynaklanır. Şekil 3.2 (c) ve Şekil 3.2 (d)' de görüldüğü gibi, uygulanacak pozitif veya negatif voltaj, her iki durumda da eklem boyunca akım oluşmasına neden olur. Akım, eklemin direnci ile belirlenir

ve uygulanan gerilimin yönünden bağımsızdır. Yani bu durum kontağın ohmik özellik gösterdiği anlamına gelir (Bilkan, 2013).

3.3. Metal-Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım-İletim Mekanizmaları

Termal dengede bir metal ile yarıiletken kontağa voltaj uygulandığında yükler hareket etmeye başlar ve yük taşıyıcıları metal ile yarıiletken arasındaki potansiyel engeliyle karşılaştığında ya engeli aşarak akım oluşturur, ya engel boyunca tünelleme yapar, ya da yeniden birleşmek suretiyle daha farklı bir akım iletim mekanizması gerçekleştirir. Metal-yarıiletken kontaklarda akıma en büyük katkı çoğunluk taşıyıcılarından gelir. Dolayısıyla MS kontaklara uygulanan voltaj altında akım iletim mekanizmalarının tayini oldukça önemli ve karmaşıktır. Çünkü burada hangi sıcaklık ve gerilim altında hangi iletim mekanizmasının etkin olduğunu belirlemek önemlidir. Oluşan mekanizmaların hangisinin aktif olacağı ve ya bu mekanizmaların ideal durumdan sapma gösterip göstermeyeceği yapısal farklılıklardan kaynaklanacağı gibi ölçümsel faktörlerden de etkilenebilmektedir. Örneğin yarıiletkenin tipi, katkı atomlarının yoğunluğu, ara yüzey tuzaklarının yoğunluğu ve bulundukları enerji seviyeleri, varsa yalıtkan tabakanın kalınlığı gibi yapıyla ilgili faktörlerin etkisine benzer şekilde, ölçümün gerçekleştiği beslem voltajının yönü ve şiddeti, yapının sıcaklığı ve *ac* sinyalinin frekansı gibi faktörler de akım iletim mekanizmaları üzerinde ciddi etkilere sahiptir.

Bu tezin de konusu olan MIS yapılarında akım iletimi için tek bir mekanizmadan bahsetmenin doğru olmayacağı açıktır.

$$I_{toplamlam} = I_{TE} + I_D + I_{TED} + I_{FE} + I_{TFE} + I_{G-R} + I_{MCI} + I_{T_0} + I_{SCLC} \quad (3.6)$$

Toplam akım Eşitlik (3.6)' da görüldüğü gibi farklı mekanizmalardan gelen katkıların cebirsel toplamı olarak ifade edilmektedir. Akım iletim mekanizmalarının gerçekleşme koşullarının farklılık göstermesinden dolayı genellikle toplam akım, baskın akım iletim mekanizmasına ek olarak diğer mekanizmalardan gelen katkıları kapsar. Ancak belirtmekte fayda vardır ki;

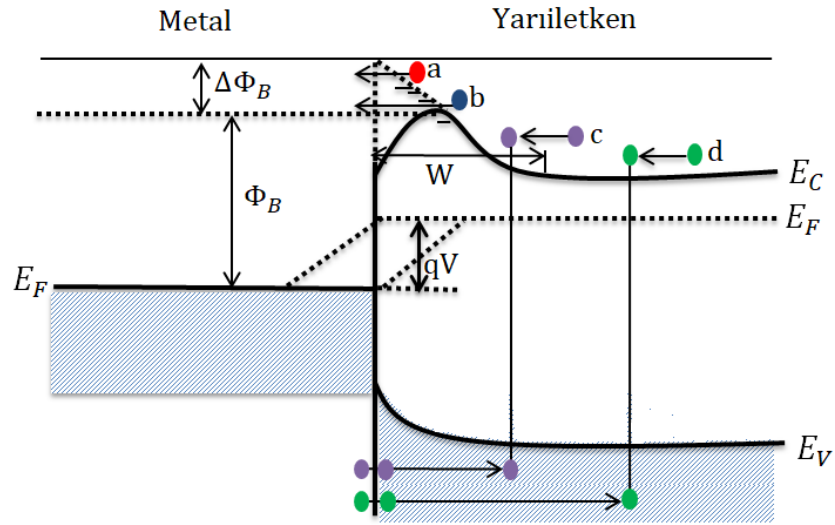
diğer mekanizmalardan gelen bu ek katkılar çoğu zaman ihmal edilecek kadar küçüktür. Burada her bir akım ifadesinin yanında alt indis olarak belirtilen kısaltmalar aşağıda sırasıyla İngilizce karşılıkları ile listelenmiştir.

- ❖ Termoiyonik emisyon (*Thermionic emission*)
- ❖ Difüzyon (*Diffusion*)
- ❖ Termoiyonik emisyon difüzyon (*Thermionic emission diffusion*)
- ❖ Alan emisyonu (*Field emission*)
- ❖ Termoiyonik alan emisyonu (*Thermionic field emission*)
- ❖ Taşıyıcı üretimi ve yeniden birleşmesi (*Carrier generation and recombination*)
- ❖ Azınlık taşıyıcı enjeksiyonu (*Minority carrier injection*)
- ❖ T_0 anormalliği (*T_0 anomaly*)
- ❖ Uzay yüküyle sınırlı akım (*Space charge limited current*)

Genel anlamda Schottky engel diyotlarda akım ya yarıiletken den metale veya metalden yarıiletken e doğrudur. Metalden yarıiletken e geçen taşıyıcıların gördüğü engel, yarıiletken den metale doğru geçenlerin gördüğü engelden yaklaşık Fermi enerjisi kadar daha büyüktür. Şekil 3.3' de gösterildiği gibi temel akım iletim mekanizmaları dört grupta toplanmıştır. Oluşma ihtimali en yüksek akım iletim mekanizması elektronların engeli aşmak için yeterli termal enerjiyi kazandıklarında potansiyel engeli üzerinden atlamaları yani termoiyonik emisyon (TE) mekanizmasıdır. Bu mekanizma, Schottky engel yüksekliğini elde edebilmek için kullanılan geleneksel bir modeldir. TE genellikle Si ve GaAs bazlı Schottky engel diyotlarında görülen baskın mekanizmadır ve ideal diyot karakteristiklerine sahiptir. Ayrıca bu akım-iletim mekanizması oda ve üzerindeki sıcaklıklarda, orta katkılı yarıiletkenlerde etkili olur. Diğer üç mekanizmadan özellikle (b) ve (c) durumunda ideal durumdan sapmalar olur. Bu durumda idealite faktörü ideal değeri 1' den oldukça büyüktür. Ayrıca engelin yüksekliği ve biçimi de sıcaklığa ve katkı atomlarının miktarına oldukça bağlıdır.

Bu çalışmada sırasıyla termoiyonik emisyon, difüzyon ve termoiyonik alan emisyonu; baskın akım-iletim mekanizmaları olarak gözlendiğinden bu

mekanizmalar üzerinde durulmuştur. Yine bu çalışmanın gözlemlerinden biri olan T_0 anormalliğine de değinilmiştir.



Şekil 3.3. Metal/*n*-tipi GaAs yarıiletkenine pozitif voltaj uygulandığında temel akım iletim mekanizmaları; (a) potansiyel engelin tepesi üzerinden metalin içine doğru elektronların iletimi (TE), (b) elektronların engelin içinden doğrudan kuantum mekaniksel tünellemeleri (engel boyunca tünelleme), (c) tükenim bölgesinde taşıyıcı birleşmesi veya üretimi, (d) azınlık taşıyıcı enjeksiyonuyla eş olan yarıiletkenin nötr bölgesindeki taşıyıcı birleşmesi (Tecimer, 2014)

3.3.1. Termoiyonik emisyon (TE) teorisi

İlk kez Hans Albrecht Bethe (1942) tarafından önerilen daha sonraki yıllarda da Crowell ve Sze (1966) tarafından ayrıntılı olarak incelenen termoiyonik emisyon teorisi MS kontaklar veya diğer adıyla Schottky engel diyotlarda, MIS ve benzeri yapılardaki akım iletiminin açıklanmasında en yaygın kullanılan teoridir. Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı termoiyonik emisyon olarak bilinir. Akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır Metal-yarıiletken kontaklarda termoiyonik emisyon mekanizması, çoğunluk taşıyıcıların (kullanılan yarıiletkenin cinsine göre elektron veya hollerin) çeşitli etkilerle termal denge durumundan sonra oluşan potansiyel engelini (Φ_b) aşabilecek kadar enerji kazandıklarında engeli aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesi durumudur. Bu durum termal denge durumunun bozulmaması ve TE mekanizmasının Maxwell-Boltzmann yaklaşımına uyabilmesi için potansiyel engelinin kT/q enerjisinden

daha büyük olduğu (geçiş bölgesinde taşıyıcı çarpışmalarının minimum olduğu taşıyıcıların ortalama serbest yollarının geçiş bölgesinin kalınlığından büyük olduğu, ya da diğer bir deyişle taşıyıcıların aldığı ortalama serbest yolun, tükenim bölgesinden daha küçük olduğu) durumdur. Burada görüntü yüklerinden kaynaklanan imaj kuvvetlerinin neden olabileceği bariyer alçalmalarının ihmal edildiği farzedilmektedir. Yük taşıyıcılarının iletimi, bariyer potansiyelinin şeklinden ziyade yüksekliğine bağlıdır (Sze,1981; Rhoderick ve Williams, 1988).

V büyüklüğünde doğru beslem gerilimi uygulanan bir MS kontak göz önünde alınacak olursa, J_{SM} yarıiletken den metale doğru akan akım yoğunluğunu ve J_{MS} ise metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğunu ifade etsin. J_{SM} akım yoğunluğu, $+x$ yönünde ve potansiyel engelini aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$J_{SM} = \int_{E_F + q\Phi_b}^{\infty} q v_x dn_x \quad (3.7)$$

Eşitlik (3.7)' de $(E_F + q\Phi_b)$ metal içinde TE için gerekli minimum enerji, v_x taşınma yönünde kontak yüzeyine dik doğrultudaki elektronların x -yönündeki hız bileşenini ifade eder.

Yarıiletken yapıda hızları (v_x) ile $(v_x + \Delta v_x)$ arasında olan elektronların yoğunluk ifadesi ise aşağıdaki gibi verilir.

$$dn_x = N_D \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right) \exp \left(-\frac{m_n^* v_x^2}{2kT} \right)^{1/2} dv_x \quad (3.8)$$

Burada N_D yarıiletkendeki katkı atomlarının yoğunluğu, m_n^* elektronun etkin kütlesi, k Boltzman sabiti ve T ise Kelvin cinsinden mutlak sıcaklıktır. V_D ' nin difüzyon potansiyelini ifade ettiği göz önünde bulundurulacak olursa, J_{SM} akım yoğunluğu $\left(\frac{1}{2} m_n^* v_x^2 > eV_D \right)$ şartını sağlayan elektronlar için aşağıdaki gibi verilir;

$$\begin{aligned}
J_{SM} &= \int_{\vartheta_{0x}}^{\infty} q \vartheta_x dn_x = \int_{\vartheta_{0x}}^{\infty} q N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \vartheta_x \exp\left(-\frac{m_n^* \vartheta_x^2}{2kT}\right) d\vartheta_x \\
&= q N_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m_n^* \vartheta_x^2}{2kT}\right) = q N_d \left(\frac{kT}{2\pi m_n^*} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right) \quad (3.9)
\end{aligned}$$

Metal tarafından görülen potansiyel engel yüksekliği ve elektronlar için etkin Richardson sabiti (A^*) ise;

$$q\Phi_{bn} = qV_D + E_F \quad (3.10)$$

$$A^* = \frac{4\pi q m_n^* k^2}{h^3} \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilir. Buradan hareketle Eşitlik (3.10) ve (3.11) cinsinden yarıiletken den metale olan akım yoğunluğu ifadesi aşağıdaki gibi düzenlenebilir;

$$J_{SM} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT}\right) \quad (3.12)$$

Metal/*n*-tipi yarıiletken Schottky kontağına pozitif voltaj uygulandığında engel yüksekliği azalacağı için akım yoğunluğu değeri $\exp(eV/kT)$ çarpanı ile orantılı olacak şekilde artar. Yarıiletken den metale doğru akım yoğunluğu J_{SM} için aşağıdaki ifade elde edilir;

$$J_{SM} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.13)$$

Termal denge durumunda ya da diğer bir deyişle uygulama gerilimi sıfır olduğunda her iki yöndeki akım yoğunlukları (J_{SM} ile J_{MS}) eşit olur.

$$J_{MS} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT}\right) \quad (3.14)$$

Eklemdeki net akım yoğunluğu ($J = J_{SM} - J_{MS}$) olacağından daha açık olarak toplam akım yoğunluğu ifadesi yazılacak olursa,

$$J_n = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.15)$$

olacaktır. Burada $J_0 = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{bn}}{kT}\right)$ ifadesi sızıntı akım yoğunluğu olarak da bilinen ters doyma akım yoğunluğudur (Cowley ve Sze, 1965).

$J=I/A$ olduğu dikkate alınarak Schottky kontakların çok ince bir ara yüzey tabakasına sahip olması durumunda, termoiyonik emisyon teorisine göre uygulanan V gerilimi için oluşan doğru beslem akım ifadesi ($V > 3kT$) durumu için;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (3.16)$$

ile verilmektedir. Burada n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve I_0 ekstrapole edilmiş doyma akım değeridir.

Seri direnç etkisini de göz önüne alarak modifiye edilmiş I_{TE} ifadesi ise;

$$I_{TE} = \underbrace{AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right)}_{I_0} \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.17)$$

R_s etkisinden dolayı bir MIS Schottky bariyer diyota ait ileri doğru beslemdeki (I-V) karakteristikleri ideal durumdan saptığı için literatürdeki ilgili çalışmalarda akımın potansiyele bu tarzdaki üstel bağıllığı genellikle kT/q ile ($\sim 1,5$ V) arasındaki bir değerde geçerli olmaktadır (Reddy vd., 2011b; Gökçen ve Yıldırım, 2012; Tataroğlu, 2013; Farag vd., 2010).

3.3.2. Homojen olmayan metal/yarıiletken kontaklarda akım iletimi

Metal/yarıiletken Schottky kontaklarda I-V karakteristiklerinin idealden sapması veya idealite faktörünün 1' den büyük çıkması metal/yarıiletken arayüzeyindeki uzaysal inhomojensizliklere atfedilmektedir (Sullivan vd., 1991; Werner ve Güttler 1991; Tung 1992). Burada Tung (1992), standart termoiyonik emisyon teorisinde gözlenen sapmaları açıklamak için,

metal/yarıiletken arayüzeyinde düzgün engel yüksekliği içerisine gömülmüş daha düşük engelli küçük lokal bölgelerden oluşan bir sistemi göz önüne almıştır. Bu küçük lokal bölgelerin tükenim bölgesinin boyutuna göre çok daha küçük, nanometre boyutlarında olduğu varsayılmıştır. Bu durumda küçük lokal bölgenin tükenim bölgesini çevreleyen diğer küçük lokal bölgelerle etkileşimi kısılma etkisi ya da potansiyel engelinde arayüzeyden uzakta eyer noktasına (saddle point) sebep olur.

Tung (1992) tarafından ön görülen, σ_T standart sapmasına sahip γ ' nin bir dağılımıyla karakterize edilen düşük engel yükseklikli dairesel küçük lokal bölgelerin toplam akım ifadesi Gaussian dağılımı düşünülerek:

$$I = AA^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}^{hom}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{nkT}\right) - 1 \right] (1 + P) \quad (3.18)$$

ifadesi ile verilmiştir. Ayrıca bu ifade $V \leq 3kT/q$ değerini de içerir. Dikkat edileceği üzere Eşitlik (3.18)' un $(1+P)$ ' ye kadar olan bölümü Eşitlik (3.17) ile verilen homojen engel yüksekliğine sahip Schottky kontağın standart termoiyonik emisyon akımıdır. Eşitlik (3.18)' da sırasıyla A, diyot alanını, R_s seri direnci, Φ_{b0}^{hom} terimi de homojen engel yüksekliğini sembolize etmektedir. $(1+P)$ terimi ise küçük lokal bölgelerin varlığından dolayı oluşan ilave akım terimidir. P küçük lokal bölge fonksiyonudur ve alan yoğunluğu (ρ) ve küçük lokal bölgelerin (γ) faktörüne bağlıdır. γ faktörü küçük lokal bölge karakteristikleriyle ilgili bir sabittir. Bu sabit;

$$\gamma = 3 \left(\frac{\Delta_p R_p^2}{4} \right)^{1/3} \quad (3.19)$$

eşitliği ile verilir. Üstelik γ parametresi eğer, $\gamma \geq 0$ için bir Gaussian dağılımına sahipse, küçük lokal bölge fonksiyonu P,

$$P = \frac{8\pi\sigma_T^2\eta^{1/3}}{9(V_{b0}-V-IR_S)^{1/3}} \exp\left(\frac{(q/kT)^2\sigma_T^2(V_{b0}-V+IR_S)^{2/3}}{2\eta^{2/3}}\right) \quad (3.20)$$

olarak ifade edilir. Burada σ_T sıfır civarında γ' nin standart sapması ve $\eta = \varepsilon_s \varepsilon_0 / q N_D'$ dir. Ayrıca ε_s ve N_D yarıiletkenin sırasıyla dielektrik sabiti ve taşıyıcı yoğunluğudur. V_{b0} ise küçük lokal bölge dışındaki düzgün engelin ara yüzey bant bükülmesidir. Diğer bir deyişle difüzyon potansiyelidir. ρ ise küçük lokal bölgelerin yüzeyce yoğunluğunu ifade eder.

Eşitlik (3.18), küçük lokal bölge parametresi γ' nin bir Gaussian dağılımına sahip dairesel küçük lokal bölgeleri içine alan inhomojen Schottky kontaklar boyunca akımı tam olarak tanımlar, ancak engel yüksekliğinin imaj kuvvetini içermez. Eşitlik (3.18)'daki akım bu nedenle iki bileşene sahiptir. Bileşenlerden biri, homojen Schottky engel yüksekliği Φ_{b0}^{hom} ve A alanına sahip olan tüm diyot üzerinden akan akım; diğeri ise düşük Schottky engel yüksekliğine sahip küçük lokal bölgelerin varlığından ileri gelen ilave akım bileşenidir.

Yukarıda verilen akım denklemlerindeki etkin engel yüksekliği homojen engel yüksekliğine bağlı olarak,

$$\Phi_{eff} = \Phi_{b0}^{hom} - \Delta\Phi, \quad \Delta\Phi = \frac{\sigma_T^2}{2kT} \left(\frac{V_{b0}}{\eta} \right)^{2/3} \quad (3.21)$$

şeklinde ve idealite faktörü,

$$n \approx 1 + \Delta n, \quad \Delta n \approx \frac{\sigma_T^2 V_{b0}^{-1/3}}{3kT\eta^{2/3}} \quad (3.22)$$

biçiminde ve küçük lokal bölgelerin etkin alanı;

$$A_{eff} = \frac{8\pi\sigma_T^2}{9} \left(\frac{\eta}{V_{b0}} \right)^{1/3} \quad (3.23)$$

eşitliği ile verilir (Tung, 1992).

3.3.3. Difüzyon teorisi

Aralarında yoğunluk farkı olan iki bölge arasında çok yoğun bölgeden az yoğun bölgeye doğru yük geçişi olayına 'difüzyon' adı verilir. İlk defa Walter Schottky (1938) tarafından önerilen bu teori belirli varsayımlar üzerine kurulmuştur (Sharma, 1984). Bu varsayımlar şöyle sıralanabilir;

- ✓ Tükenim bölgesi sınırlarındaki ($x=0$ ve $x=W$) taşıyıcı yoğunluğu termal denge değerlerine sahip olup akımdan etkilenmez.
- ✓ Potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden daha büyüktür.
- ✓ Akım, difüzyon ve sürüklenme ile sınırlanmıştır. Burada tükenim bölgesindeki elektronların çarpışma ihtimalleri (difüzyonu) akıma dahil edilmiştir.
- ✓ Yarıiletkendeki safsızlık yoğunluğu dejenere değildir. Yani katkı atomlarının yoğunluğu değişmez.

Bu varsayımlardan yola çıkarak tükenim tabakasındaki akım yoğunluğu, metal/ n -tipi yarıiletken kontaklar için, bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$J_x = J_n = q \left[n(x) \mu_n E(x) + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] = q D_n \left[\left(-\frac{qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (3.24)$$

Burada D_n elektron difüzyon sabiti, $E(x)$ tükenim bölgesinin elektrik alanı, μ_n taşıyıcı hareketliliği (mobilité) ve $n(x)$ herhangi bir x noktasındaki taşıyıcı yoğunluğudur.

$$J = J_{SD} \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.25)$$

Burada J_{SD} doyma akım yoğunluğu olup şu şekilde ifade edilir;

$$J_{SD} = \left(\frac{q^2 N_C D_n}{kT} \right) \left[\frac{2q(V_d - V) N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp \left(-\frac{q\Phi_B}{kT} \right) \quad (3.26)$$

Burada N_C iletkenlik bandındaki birim hacim başına (cm^{-3} veya m^{-3}) izinli enerji durumlarının yoğunluğu (etkin taşıyıcı yoğunluğu), ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir. TE teorisine nazaran difüzyon teorisinin voltaja bağlılığı daha fazla, sıcaklığa bağlılığı daha azdır. Eşitlik (3.26)' de D_n yerine D_p , $n(x)$ yerine $p(x)$, N_C yerine N_V , N_D yerine de N_A yazılırsa benzer işlemler metal/ p -tipi yarıiletken kontaklar için de geçerli olur.

3.3.4. Termoiyonik emisyon difüzyon (TED) teorisi

Crowell ve Sze (1966) termoiyonik emisyon teorisi ile difüzyon teorisini sentezleyerek termoiyonik emisyon difüzyon teorisini geliştirmişlerdir. Termoiyonik emisyon teorisinde tükenim bölgesindeki elektron çarpışmaları ihmal edilmiştir Düşük mobiliteye sahip yarıiletkenlerde ise yük taşıyıcılarının çarpışmaları ihmal edilemez. Crowell ve Sze (1966) termoiyonik emisyon ve difüzyon akımlarının birbirine seri bağlı olduğunu kabul ederek özel koşullar altında hem (I_{TE}) hem de difüzyon akımı (I_D) değerini verebilen ortak bir akım ifadesi elde etmişlerdir. Her iki işlem için de akımı eşitleyen quasi-Fermi seviyesini bularak tek bir işlem olarak değerlendirmişlerdir. Görüntü yüklerinin sebep olduğu kuvvetlerden kaynaklanan bariyer alçalmasını da göz önüne alan bu teoriye göre Fermi seviyesi (E_F) konumla birlikte değiştiğinden, termoiyonik emisyon difüzyon akımı (I_{TED}) aşağıdaki eşitlikle verilir;

$$I_{TED} = n\mu A \frac{dE_F}{dx} \quad (3.27)$$

Gerekli hesaplamalardan sonra (Sze, 1981) I_{TED} aşağıdaki Eşitlik (3.28) deki halini alır.

$$I_{TED} = \frac{qAN_C\vartheta_R}{1+(\vartheta_R/\vartheta_D)} \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \exp\left[\left(-\frac{qV}{kT}\right) - 1\right] \quad (3.28)$$

Burada ϑ_R ve ϑ_D 'nin yük taşıyıcılarının bariyerin tepesindeki birleşme hızı olduğu göz önünde bulundurulduğunda, tükenim bölgesi boyunca ϑ_D 'nin yaklaşık olarak $\mu E'$ ye eşit olduğu görülür. Elektronların Maxwell dağılımına

uyduğu ve akım yoğunluğu $qn\vartheta_R$ olan elektronlar dışındaki elektronların bariyerden geri dönmediği durumda $\vartheta_R = A^*T^2/qN_C$ olduğu kullanılırsa; $\vartheta_D \gg \vartheta_R$ durumunda üstel terimin önündeki ifadede ϑ_R baskın olacağından akım ifadesi I_{TE}' ye, tersi durumda ise I_D' ye dönüşür.

3.3.5. Tünelleme (Alan emisyonu (FE/AE) ve termoiyonik alan emisyonu (TFE/TAE))

Alan emisyonu teorisi yük taşıyıcılarının bariyeri aşmaya gerek kalmadan bariyer içerisinden kuantum mekaniksel tünelleme yapmak suretiyle meydana getirdiği akımı açıklamaya yönelik bir teoridir. Metal-yarıiletken kontaklarda potansiyel engeli ile karşılaşan elektronlar potansiyel engelinin ince olduğu (tükenim tabakasının genişliğinin az olduğu) durumlarda engel üzerinden atlamaya gerek kalmadan doğrudan engel içinden tünelleme yoluyla metal tarafına geçebilirler (Cowley ve Sze, 1965). Bu akım iletim mekanizmasının düşük sıcaklıklarda ve yüksek katkılı yarıiletkenlere sahip Schottky bariyer diyotlarda görülmesi muhtemeldir. Kuantum mekaniksel tünellemeyi içeren alan emisyonu teorisine yönelik yapılan ilk çalışmalarındaki varsayımlar;

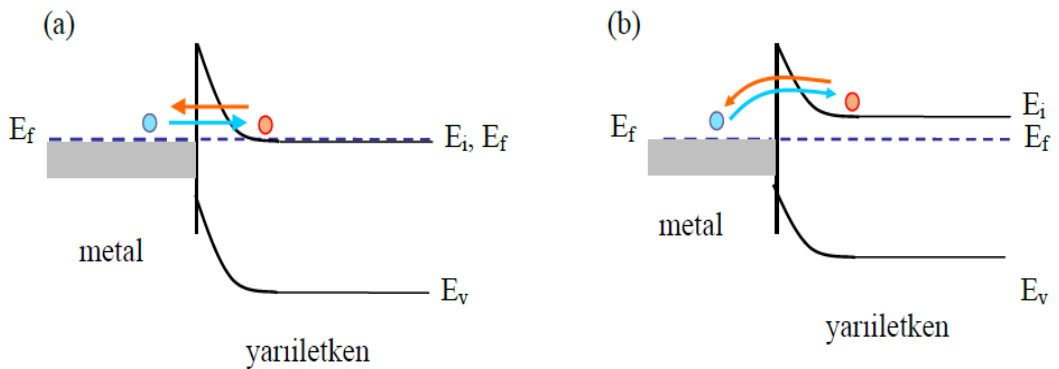
- ✓ Görüntü yüklerinden kaynaklanan kuvvetlerin neden olduğu bariyer alçalmasının ihmal edilmesi,
- ✓ Bariyerin üzerinden geçecek kadar enerjiye sahip olan elektronların bariyerin tepesindeki kuantum mekaniksel yansımalarının ihmal edilmesi,
- ✓ Elektronların Boltzmann dağılımına sahip olmasıdır (Crowell ve Rideout, 1969; Padovani ve Stratton, 1966).

Daha sonraki çalışmalarda görüntü yüklerinin bariyer üzerindeki etkisinin ve kuantum mekaniksel yansımalarının ihmal edilmediği durum göz önüne alınmış ve dejenere Fermi istatistiği kullanılarak yapılan hesaplamaların da benzer sonuçlar verdiği görülmüştür. Alan emisyonunda yarıiletkenin aşırı katkılanması durumunda yarıiletkendeki Fermi seviyesi hizasında enerji seviyeleri oluşur, dolayısıyla düşük sıcaklıklarda enerjisi Fermi enerjisi civarında olan elektronlar metale tünelleme yoluyla geçiş yapabilirler. Diğer bir

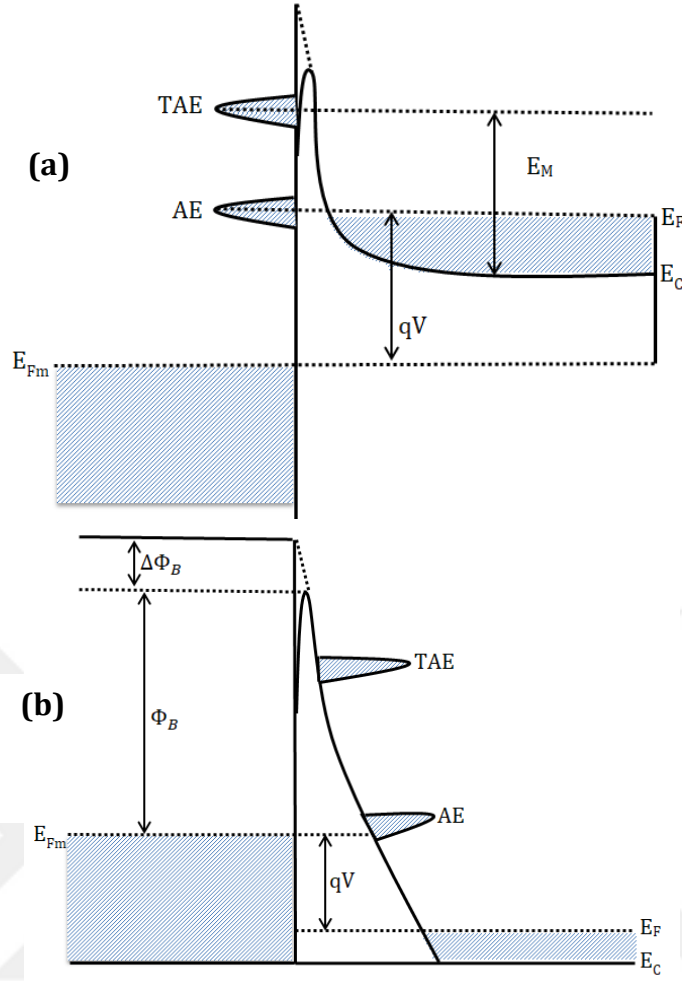
nokta ise katkı atomlarının yüksek yoğunluğu nedeniyle tükenim tabakası genişliğinin incelmesidir ki, elektronlar böylece ince tükenim tabakası boyunca daha kolay tünelleme yapabilirler.

Elektronların kuantum mekaniksel tünelleme yaparak gerçekleştirdiği diğer bir akım iletim mekanizması TFE' dir. TFE yüksek enerjilere uyarılabilecek, dar üçgen potansiyel boyunca tünellenebilecek olan elektronların termal enerjileri yardımıyla akıma katkıda bulunmasıdır. TFE' de bariyerin genişliği elektronların düşük sıcaklıklarda doğrudan tünelleme yapabileceği kadar ince değildir. Dolayısıyla elektronlar önce bariyer kalınlığının tünellemeye izin vereceği daha yüksek bir enerji seviyesine termal olarak uyarılırlar. Böylece kuantum mekaniksel tünelleme gerçekleşir. (Şekil 3.4) ve (Şekil 3.5)' de sırasıyla bu akım iletim mekanizmalarının oluşum görselleri verilmiştir.

Engel kalınlığı ve yüksekliği azalırken, Fermi seviyesinin üzerinde enerjiye sahip elektronların sayısı azaldığından TFE' nin katkısının maksimum olduğu Şekil 3.5' de görüldüğü gibi E_M büyüklüğünde bir enerji seviyesi ortaya çıkar. Eğer sıcaklık derece derece arttırılırsa pratikte tüm taşıyıcılar daha büyük enerji kazanarak engelin tepesinden metalden yarıiletken veya yarıiletkenden metale geçebilirler. Genelde bu durumda TE teorisi tek başına baskın hale gelir.



Şekil 3.4. a) AE ve b) TAE mekanizmalarının oluşumu (Güllü, 2008).



Şekil 3.5. Schottky engel diyotlarda a) doğru ve b) ters beslemlerde TAE ve AE mekanizmaları (Tecimer, 2014)

Alan emisyonu ve termoiyonik alan emisyonu için akım ifadesi;

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{qV}{E_0}\right) \quad (3.29)$$

Bu ifadedeki $E_0 = E_{00} \coth\left(\frac{qE_{00}}{kT}\right)$ ve $E_{00} = \frac{h}{4\pi} \left(\frac{N_D}{m_e^* \epsilon_s}\right)^{1/2}$ şeklinde verilmektedir. Burada h ($=6,62 \times 10^{-34}$ J.s) Planck sabiti, m_e^* ($=0.067m_0$) elektronun etkin kütlesi, ϵ_s ($=13.1\epsilon_0$; GaAs için) dielektrik sabiti, N_D taşıyıcı yoğunluğudur. E_{00} tünelleme olasılığını temsil eden karakteristik enerjidir. Aynı zamanda tükenim tabakası kenarında iletkenlik bandının kenarıyla çakışık enerjili bir elektron için karşı tarafa geçme ihtimalinin $1/e'$ ye karşılık gelen Schottky engelinin difüzyon potansiyelidir. kT/E_{00} ifadesi ise bize akım iletim mekanizmasıyla ilgili bilgi verir. Schottky kontaklarda tünelleme etkisine göre kontakta egemen olan

taşıyıcı mekanizmasını açıklayabilmek bu ifade ile mümkündür. Böylece kontakta;

- $E_{00} \ll kT/q$ ise termoiyonik emisyon (TE)
- $E_{00} \gg kT/q$ ise alan emisyonu (FE)
- $E_{00} \approx kT/q$ ise termoiyonik alan emisyonu (TFE) mekanizmalarının oluşma ihtimali yüksektir (Cowley ve Sze, 1965).

3.3.6. T_0 etkili akım iletimi

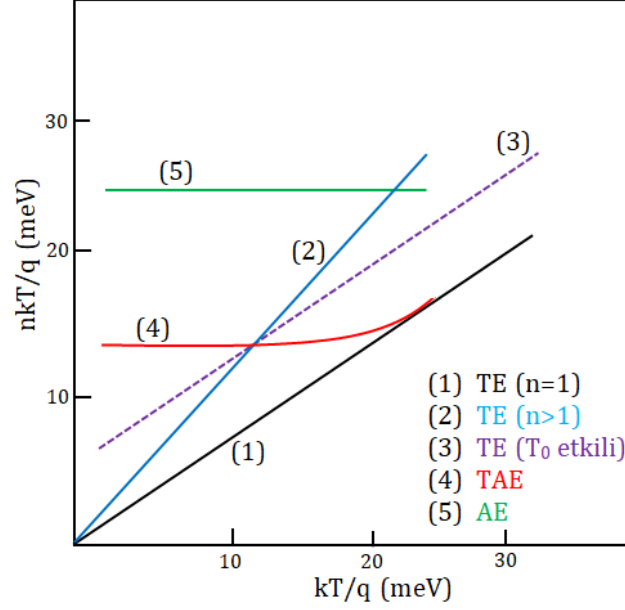
İdealite faktörü (n) yapılan diyodun ideallik derecesini belirleyen boyutsuz bir niceliktir. İdealde 1'e eşit olması gereken bu niceliğin pratikte 1' den oldukça büyük çıkması diyetun performansını düşürür. İdealite faktörünün birden büyük olması hayali kuvvet ya da ara yüzey durumlarından kaynaklanıyorsa n sıcaklıktan bağımsız olmalıdır. Eğer n' nin 1' den büyük oluşu termoiyonik emisyon dan ya da tükenim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından kaynaklanıyorsa n değeri sıcaklığa bağlıdır. Normal olmayan bu duruma T_0 etkisi ya da T_0 anormalliği denir. n' nin sıcaklığa bağıllığı deneysel olarak;

$$n = 1 + \left(\frac{T_0}{T}\right) \quad (3.30)$$

ifadesiyle verilir. Eşitlik (3.30)' de T_0 geniş bir sıcaklık aralığında sıcaklık ve voltajdan bağımsız olan sabit bir parametredir. Akım ifadesini yazacak olursak;

$$I = AA^*T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_b}{k(T+T_0)}\right] \left(\exp\left[\frac{qV}{k(T+T_0)}\right] - 1\right) \quad (3.31)$$

olur. İlk araştırmalarda T_0 anormalliğinin yüzey durumlarının üstel enerji dağılımıyla alakalı olduğu düşünülmüştür ancak sonraları Crowell (1977) çalışmalarında böyle olmadığına işaret etmiştir. Dahası, tükenim bölgesindeki ara yüzey sel bozukluklarının ya da metal elektronlarının yarıiletkenin yasak enerji aralığına doğru tünelleme yapmasından kaynaklanan ara yüzey durumlarından dolayı da T_0 anormalliğinin görülebilir olduğu literatürde belirtilmiştir (Sharma, 1984).



Şekil 3.6. Voltaja bağlı farklı akım iletim mekanizmalarını gösteren (nkT/q) - (kT/q) eğrisi.(Özavcı, 2014; Tecimer, 2014; Bilkan, 2016)

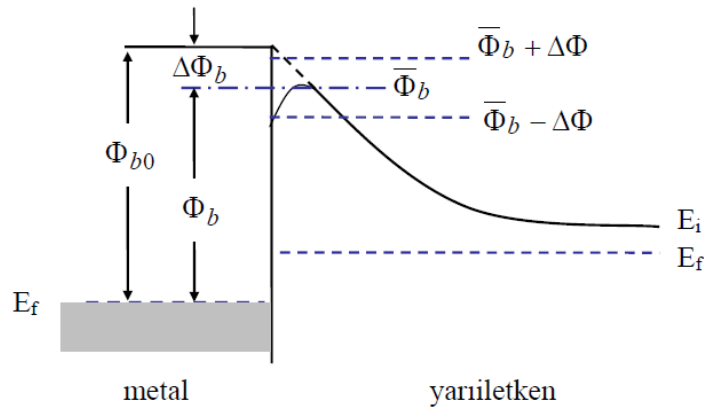
(1) $n=1$, (2) $n>1$ ve (3) T_0 etkili şekilde gösterilen eğrilerdir ki bunlar TE mekanizmasının baskın olduğu durumları belirtmektedir. (4) eğrisi TAE ve (5) eğrisi AE mekanizmalarının etkin olduğu durumları belirtmektedir (Altındal vd., 2006).

3.4. Potansiyel Değişim Modeli ve Homojensizlikler

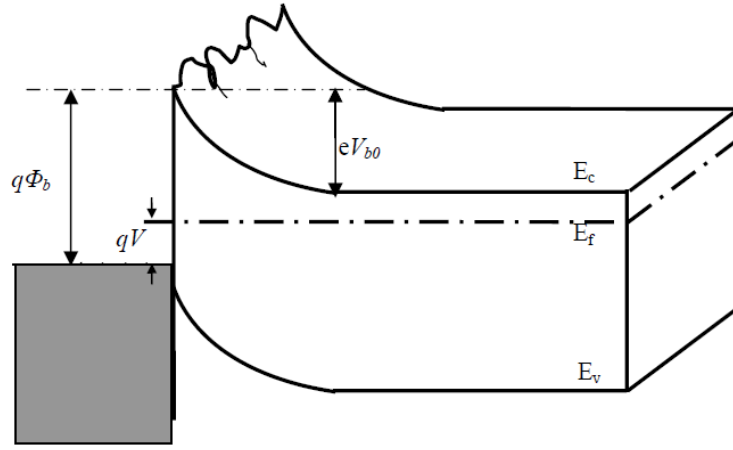
Metal ile yarıiletken arayüzeyinde uzaysal homojensizliklerin var olması I-V eğrilerinde idealden sapmalara ($n>1$) neden olabilir. MS tipi Schottky bariyer diyotlarda doğru beslem I-V eğrisinden elde edilen Φ_b ile ters beslem C-V eğrisinden elde edilen Φ_b aynı sonuçları vermemektedir. I-V ve C-V' den elde edilen engel yüksekliği farkı ile n' nin 1' den büyük oluşu çeşitli şekillerde açıklanmaya çalışılmıştır. Metal ile yarıiletken arayüzeyi atomik yapı bakımından düzenli değildir. Metaldeki atomik ve yapısal kusurlar, kalınlık farklılıkları, alan emisyonundan dolayı lokal engel yüksekliğinin azalması, farklı metalik fazların etkisi ve donör atomlarının rastgele dağıldığı düzenli örgüde donör atomları arasındaki düzensiz mesafeler arayüzeyin pürüzlü olmasına neden olur. Bu durum dağılımda homojensizlik demektir. Dolayısıyla da farklı V_D ve Φ_b değerlerine sebep olur. Bütün bu etkenlerden dolayı engel

yüksekliğinin bir Gaussian dağılımına sahip olduğu düşünülmüştür (Song vd., 1986; Tung, 1992).

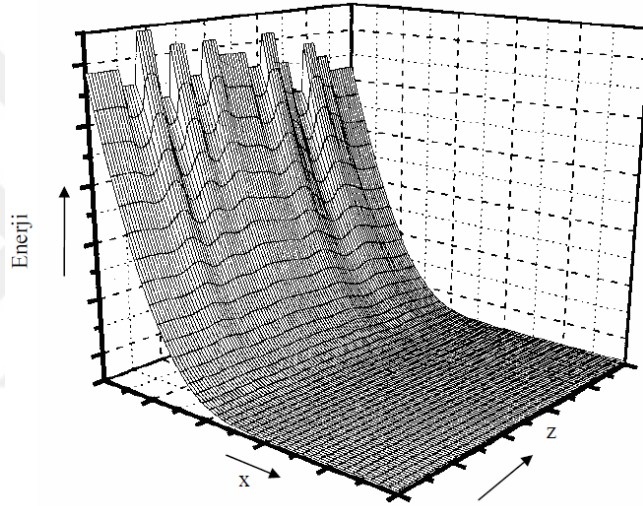
Schottky bariyer diyotlarda özellikle düşük sıcaklıklarda ideal durumdan sapmalar gözlenmektedir. Özellikle düşük sıcaklıklarda n değerinin büyük olması ve $\ln(I_0/T^2) - 1/nT$ eğrisi lineer iken $\ln(I_0/T^2) - 1/T$ grafiğinin lineer olmayışını tünelleme, imaj-kuvvet ya da tükenim bölgesindeki rekombinasyon akımı etkileri ile izah etmek mümkün değildir (Tung, 1992; Wittmer ve Freeouf, 1994). Bu durumları açıklamak için engel homojensizlikleri, ara yüzey tabaka ve ara yüzey durumları gibi birçok durum incelenmiştir (Tung, 1991; Tung, 1992). Düşük sıcaklıklardaki bu normal olmayan durumları en iyi açıklayan model engel homojensizliği modelidir. Bu modelde Schottky engelini düzgün olmadığı varsayılarak homojen olmayan engeller için akım-voltaj ilişkisine dair bir ifade elde edilmiştir (Tung, 1991; Tung, 1992). Bu ifadede çok sayıda bilinmeyen parametre mevcuttur. Daha sonra Werner ve Gütter (1991) tarafından geliştirilen modelle n için modifiye edilmiş yeni bir ifade elde edilmiştir. Ayrıca bu modelde engel yüksekliği için olasılık yoğunluğunun uygulanan voltaj ve sıcaklığa bağlı olmayan, ortalama bir standart sapmaya sahip Gauss dağılımlı bir yoğunluk olduğu kabul edilmiştir. Şekil 3.7' de görüldüğü gibi bazı kısımlarda Φ_b , ortalama engel yüksekliğinden ($\bar{\Phi}_b$) $\Delta\Phi$ kadar sapmıştır. Burada daha çok potansiyel engeli ve engel yüksekliğinin Gauss dağılımıyla ilgilenilmiştir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' da ise sırasıyla metal-yarıiletken arayüzeyindeki homojensizlikler 2 ve 3 boyutlu uzayda gösterilmektedir (Osvold, 1999).



Şekil 3.7. Metal/yarıiletken arayüzeyinde homojen olmayan engel modeline göre şematik enerji diyagramı (Güllü, 2008)



Şekil 3.8. Homojen olmayan engel yüksekliğine sahip bir Schottky engel diyotun V gerilimi altında iki boyutlu bant diyagramı (Güllü, 2008)



Şekil 3.9. Bir metal/yarıiletken doğrultucu kontak için örnek potansiyel engelinin bilgisayar simülasyonu ile elde edilen üç boyutlu yanal inhomojenliğinin görüntüsü (Osvald, 1999)

Song vd. (1986) tarafından ortaya atılan teoriye göre, σ_s standart sapma, $(\bar{\Phi}_b)$ ortalama engel yüksekliği olmak üzere Φ_b engel yüksekliğinin bir Gaussian dağılımına sahip olduğu kabul edilmektedir. Bu dağılım;

$$P(\Phi_b) = \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{\Phi_b - \bar{\Phi}_b}{2\sigma_s^2} \right] \quad (3.32)$$

şeklinde ifade edilir. Standart sapma ve Schottky engel yüksekliğinin ortalama değerinin Gaussian parametrelerine lineer olarak bağlı olan uygulama gerilimleri oldukları kabul edilirse bu ifadeler aşağıdaki denklemlerde verildiği şekildedir.

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_b &= \bar{\Phi}_{b0} + \rho_2 V \\ \sigma_s^2 &= \sigma_{s0}^2 + \rho_3 V\end{aligned}$$

Burada ρ_2 ve ρ_3 sıcaklığa bağlı olabilen ve engel yüksekliği dağılımının voltaj değişimlerini tanımlayan nicelikler olup voltaj katsayıları olarak adlandırılmaktadır. Pozitif voltaja bağlı toplam akım ifadesi;

$$I(V) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\Phi_b, V) P(\Phi_b) d\Phi \quad (3.33)$$

ile verilir. Eşitlik (3.33)' de verilen aralıklarda integral alındığında elde edilen sonuç aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$I(V) = AA^* T^2 \exp \left[-\frac{q}{kT} \left(\bar{\Phi}_b - \frac{q\sigma_s^2}{2kT} \right) \right] \exp \left(\frac{qV}{n_{ap} kT} \right) \left[1 - \exp \left(-\frac{qV}{kT} \right) \right] \quad (3.34)$$

Saturasyon (doyma) akımı ise;

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left(-\frac{q\Phi_{ap}}{kT} \right) \quad (3.35)$$

ile verilir. Burada n_{ap} ve Φ_{ap} sırasıyla görünen (apparent) idealite faktörü ve engel yüksekliğidir. Osvald (1999) tarafından ideal durum için ($n=1$) önerilen single-Gaussian dağılımına göre;

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{b0} - \frac{q\sigma_{s0}^2}{2kT} \quad (3.36)$$

ve

$$\frac{1}{n_{ap}(T)} - 1 = -\rho_1(T) = -\rho_2 + \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (3.37)$$

ile tanımlanır. Sonuç olarak elde edilen ifade;

$$\ln \left(\frac{I_0}{T^2} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{q\sigma_{s0}}{kT} \right)^2 = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{b0}}{kT} \quad (3.38)$$

dir. Eşitlik (3.38)' den de görüldüğü gibi sıfır voltajdaki engel yüksekliği artan sıcaklık ile artar. Bu duruma özellikle düşük sıcaklıklarda Gaussian dağılımı neden olur. Etkilenme miktarı engel yüksekliğinin standart sapmasına bağlıdır. İdealite faktöründeki artışlar engel yüksekliğinin ortalaması ve voltaj değişimi ile oluşan standart sapmaya bağlıdır (Soylu, 2007).

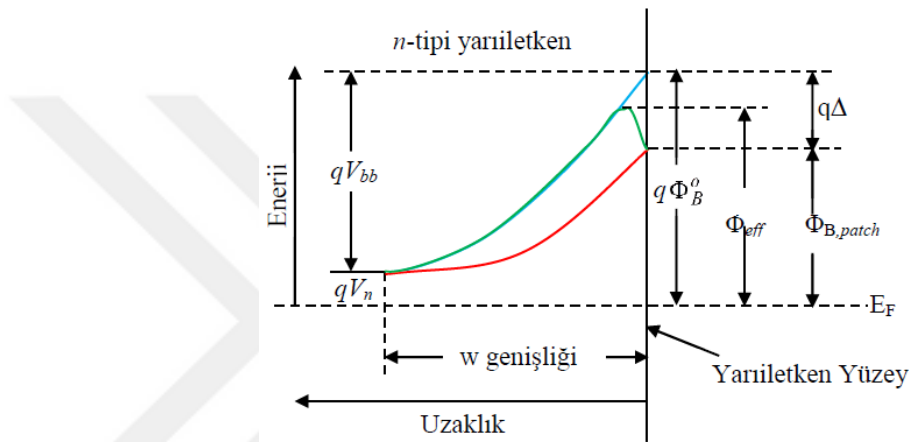
3.5. Schottky Diyotlarda İnhomojen Engel Yüksekliği

Metal-yarıiletken kontaklar yapılırken idealde beklenen durum pürüzsüz bir arayüzeye sahip olmasıdır. Ancak farklı tekniklerle oluşturulan metal ile yarıiletken arasındaki ara yüzey her koşulda atomik olarak homojen değildir. Atomik yapıdaki dislokasyonların ve tane sınırlarının yanında metalin kalınlığındaki değişim de arayüzeyin inhomojen olmasına neden olabilmektedir (Sullivan vd., 1991; Werner ve Gütter, 1991). Bu inhomojenlik lokal olarak potansiyel veya elektrik alan değişimlerine neden olabilir. Bu değişimlerin bir başka nedeni alan emisyonlarından dolayı engel yüksekliğindeki farklılıklar olabilir (Horvath vd., 2003; Ayyıldız vd., 1996). Arayüzeyde farklı metalik fazların etkisi de yerel değişimleri ortaya çıkarabilir. Ayrıca, yarıiletkendeki donör atomlarının rastgele dağıldığı düzenli bir örgüde, donör atomları arasındaki düzensiz mesafeler de bahsedilen potansiyel değişimlerinin bir diğer nedeni olabilir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9' da da görüldüğü gibi homojen olmayan Schottky kontaklar için potansiyel değişim modeli daha önce yapılan modellemelerden farklıdır (Werner and Gütter, 1991).

Önceki çalışmalarda değişik engel yüksekliğine sahip homojen ve inhomojen Schottky diyotlara sıkça yer verilmiştir. Tüm modellerin düşük ve yüksek engel bölgelerindeki izahı farklıdır. Modellemelerde engellerin düzensiz değiştiği kabul edilerek birbirinden ayrılmış yüksek ve düşük engel yüksekliklerine sahip engellerin yüzey yükü bölgelerinin genişlikleri de farklılık gösterir.

Sullian vd. (1991) ile Tung (1992), engel yüksekliği inhomojenliğinin varlığını açıklayan diğer bir modelde daha yüksek engel yükseklikleriyle çevrilmiş farklı

engel yükseklikli küçük lokal bölgelerin (patches) varlığını teorik ve deneysel çalışmalarıyla ortaya koymuştur. Bu durum metal-yarıiletken arasında engel yüksekliğinin yanıl (lateral) olarak inhomojen olduğunu gösterir. Bu küçük lokal bölgelerin çapı yüklerden arınmış tükenim bölgesinin genişliğinden daha küçük ya da ona eşit olabilir. Bu küçük lokal bölgeler arasındaki etkileşmeye 'kısılma (pinch-off)' adı verilir. Bu modele göre kısılma durumu sadece engel inhomojenliğinin yüksek ve düşük engel yükseklikli küçük lokal bölgelerin çok küçük boyutta olduğunda fark edilebileceğini öngörür.



Şekil 3.10. Bir metal/yarıiletken doğrultucu kontakta kısılma durumunu gösteren enerji-bant diyagramı (Rossi ve Lewis, 2001)

Şekil 3.10' da görüldüğü gibi kısılma etkisinin oluşumu, yarıiletken taşıyıcı yoğunluğuna, küçük lokal bölgelerin yarıçapına ve engel yüksekliği farkına bağlıdır. Şekil 3.10, belli bir n -tipi yarıiletkende konumun fonksiyonu olarak iletkenlik bandının enerji minimumunu göstermektedir. Burada Φ_b^0 homojen engel yüksekliği, Φ_{eff} deneysel olarak ölçülen engel yüksekliği (taşıyıcıların aştığı engel yüksekliği) ve $\Phi_{b,patch}$ ' de küçük lokal bölgenin engel yüksekliğidir. Gerçek engel yüksekliği $\Phi_{b,patch}$ olduğu halde, kısılma olayından dolayı engel yüksekliği biraz artarak Φ_{eff}' e eşit olur. Bahsi geçen Schottky diyodun engel yüksekliği $\Phi_{b,patch}$ kadardır. Ayrıca $\Phi_b^0 = \Phi_b^{hom}$ dir. Böylece,

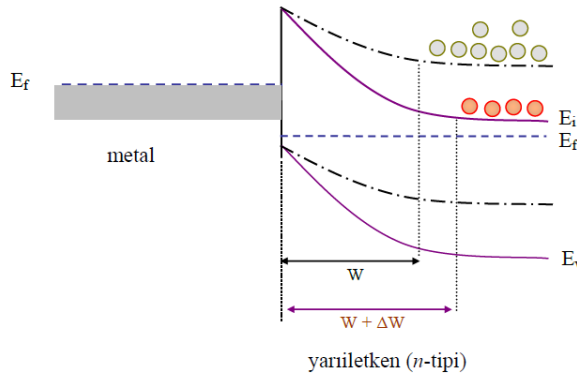
$$\Delta q = q\Phi_b^0 - \Phi_{b,patch} \quad (3.39)$$

eşitliği yazılabilir (Rossi ve Lewis, 2001).

Böylece bu ve önceki bölümde Schottky diyotların ideal durumdan sapma nedenlerini açıklayan ‘engelin inhomojenliği modeli’ özetlenmiş oldu. Bu durumdaki davranışlar da önceki bölümde izahı yapılan Gaussian dağılımı kullanılarak açıklanabilmektedir.

3.6. Schottky Engel Diyotların Kapasitansı

Schottky kontaklarda yükler pozitif ve negatif bölgeler oluşturdıklarından bu yük ayrışmasından dolayı paralel plakalı kondansatör gibi düşünülebilirler.



Şekil 3.11. Bir metal/*n*-tipi yarıiletken Schottky bariyer diyotun voltaja bağlı enerji-bant diyagramı (Güllü, 2008)

Şekil 3.11’ den de görüldüğü gibi tükenim bölgesi, yük durumlarına ve uygulama voltajına karşı hassastır. Kapasitans ölçümleri yapılırken özellikle negatif voltaj (ters beslem) altında elde edilen veriler bize bazı diyot parametreleri hakkında önemli bilgiler verir. Çünkü negatif voltaj değeri arttıkça yarıiletkende iletkenlik bandı elektronları geriye çekilerek tükenim tabakası genişliğinin $W + \Delta W$ kadar genişlemesine, dolayısıyla da kapasitansta değişime neden olur. Voltaja bağlı C- V ölçümleri yapılırken *dc* sinyal üzerine bir de *ac* sinyal bindirilir. Voltajın fonksiyonu olarak Schottky kapasitansı şöyle ifade edilebilir (Bilkan, 2016; Taşcıoğlu, 2012);

$$C = A \left[\frac{q \epsilon_s \epsilon_0 N_D}{2(V_d \pm V)} \right]^{1/2} = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{d} A \quad (3.40)$$

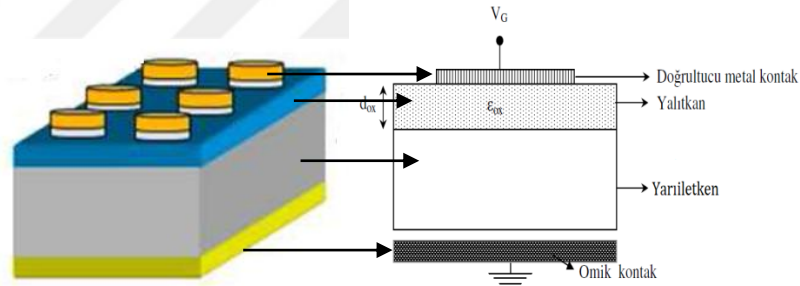
Eşitlik (3.40)’ da sırasıyla; A diyot alanını, ϵ_s kullanılan yarıiletkenin dielektrik sabitini, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabitini, N_D kullanılan yarıiletkene katkılanan

verici atomların yoğunluğunu, V_d difüzyon potansiyelini, V ise diyoda uygulanan doğru ya da ters beslem potansiyelini sembolize etmektedir.

3.7. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Kapasitörler

Bir MIS yapı Şekil 3.12' de gösterildiği gibi yarıiletken malzeme üzerine yalıtkan malzemenin büyütülerek doğrultucu ve ohmik kontaktların oluşturulmasıyla elde edilir. MIS yapılar önceki bölümlerde bahsedilen Schottky-Mott teorisine uyum sağladıklarından akım karakteristiklerinin araştırılmasında temel alınmaktadır. Öte yandan admittans karakteristiklerinin incelenmesinde ideal MIS kapasitör yaklaşımı temel alınmaktadır. Simon Min Sze (1981) ideal MIS kapasitörünü;

- (a) beslem altında herhangi bir ara yüzey tuzak yükü bulunmayan,
- (b) dc beslem altında yalıtkan üzerinde herhangi bir taşıyıcı iletiminin olmadığı kapasitör olarak tanımlamıştır.



Şekil 3.12. MIS yapının şematik gösterimi

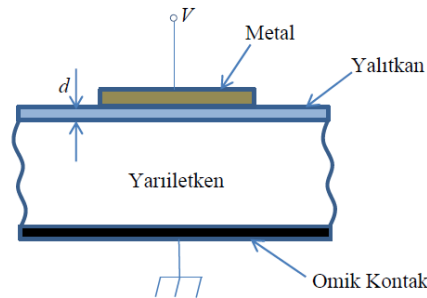
Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyin yalıtkan seçilmesi ile MS yapıyı MIS yapıya; arayüzeyin organik (polimer) seçilmesiyle ise MPS yapıya dönüştürebiliriz. Bu tip kapasitörler yarıiletken yüzeylerin çalışılmasında çok faydalı devre elemanlarıdır. Bu elemanların performansı, kararlılığı ve güvenilirliğindeki çoğu problem yüzey şartları ile yakından ilişkilidir. Bu sebepten metal ile yarıiletken arasındaki yük geçişini düzenleyerek birbirinden izole edebilecek ara yüzey tabakası seçimi büyük önem taşır. Kontrol edilebilir akım iletim mekanizmaları gerçekleştirilmesi, sızıntı akımının azaltılması ve

elektriksel iletkenlik sağlanması nedeniyle genellikle oksit ya da organik (Aldemir, 2007) ara yüzey tabaka tercih edilmektedir.

Metal-yarıiletken Schottky diyotlar, hem ara yüzey tabakaya hem de seri dirence sahip ise diyot üzerine uygulanan geçit voltajı (V_G); ara yüzey tabaka (V_i), yapının seri direnci (V_R) ve diyot (V_D) tarafından paylaşılır ($V_G = V_D + V_{R_s} + V_i$). Bundan dolayı MIS ya da MPS yapılarında akım-iletimi MS yapılardan farklıdır. M/S arayüzeyindeki doymamış bağlardan veya safsızlıklardan kaynaklanan durumlar, yalıtkan tabaka büyütülmesi sırasında yöntemle ilgili olarak ortaya çıkan hareketli iyonlar, tuzaklar ve ara yüzey yüklerinin varlığıyla MIS yapının özelliklerini değiştirerek idealden sapmasına sebep olmaktadır.

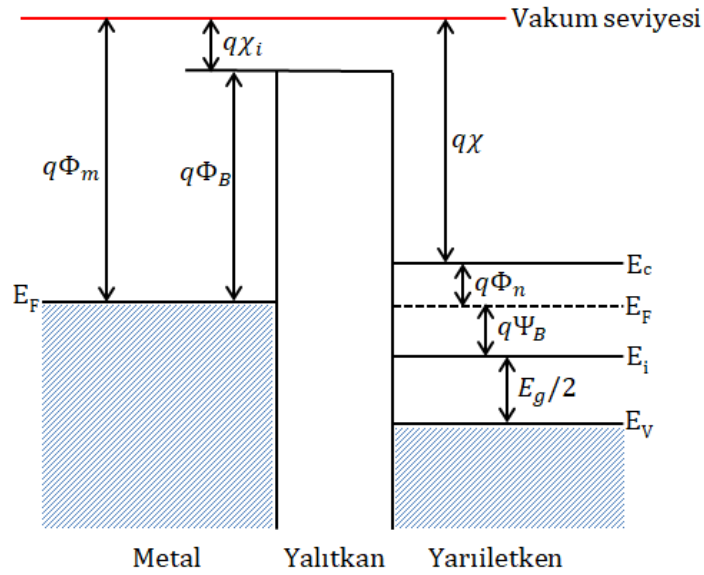
MIS yapı ilk olarak voltaj kontrollü varistör (değişken kapasitör) olarak Moll (1959), Pfann ve Garrett (1959) tarafından önerilmiştir. Yapının karakteristikleri ise daha sonra Frank (1961) ve Lindner (1962) tarafından analiz edilmiştir. İlk başarılı MIS yapı silikon yüzeyi üzerine SiO_2 'nin termal olarak büyütülmesi ile Ligenza ve Spitzer (1960) tarafından oluşturulmuştur. Bu yarı deneysel başarı Kahng ve Atalla (1960)'nın ilk MOSFET raporlarına ışık tutmuştur. Daha sonraki çalışmalarda ise Terman (1962), Lehovec ve Slobodskoy (1963) tarafından SiO_2 -Si sisteminin rapor edilmesidir. MOS kapasitörün kapsamlı çalışması ise Nicollian ve Brews (1982) tarafından yazılan *MOS Physics and Technology* isimli eserde ortaya konmuştur. SiO_2 -Si sistemi en ideal ve pratik MIS yapı olarak günümüze dek ulaşmıştır.

3.8. İdeal MIS Kapasitör



Şekil 3.13. MIS tipi kapasitörün basit gösterimi (Karabulut, 2014)

Basit bir metal-yalıtkan-yarıiletken yapısı Şekil 3.13' de gösterilmiştir. Burada d , yalıtkanın kalınlığını, V ise uygulanan voltajı göstermektedir. Metal ile yarıiletken kontak edilip termal dengeye ulaştıktan sonra herhangi bir voltaj uygulanmadığında metalin Φ_m ve Φ_s arasındaki fark sıfır olmaktadır. Bir dc sinyali altında metalle yarıiletken arasındaki yalıtıkta yük geçişleri yoktur. Diğer bir deyişle yalıtkanın direnci sonsuzdur. Eğer voltaj uygulanırsa yükler yalıtkan yüzeyinde toplanır. Metalle yarıiletken yüzeyindeki yükler eşit miktarda ve zıt yönlü olur. İdeal bir MIS yapının $V=0$ durumunda yani uygulama voltajının olmadığı düz bant koşullarında enerji-bant diyagramı da Şekil 3.14' de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. $V=0$ ' da dengedeki ideal MIS kapasitörün enerji-bant diyagramı (n -tipi yarıiletken) (Bilkan, 2016)

Şekil 3.14' den yola çıkarak n -tipi yarıiletken için;

$$\Phi_{ms} = \Phi_m - \left(\chi + \frac{E_g}{2q} - \Psi_B \right) = 0 \quad (3.41)$$

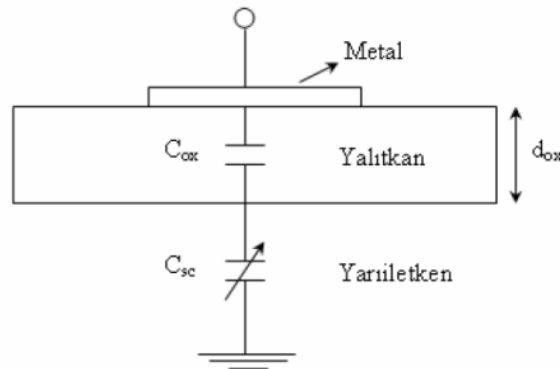
ifadesi elde edilir. Burada χ yarıiletkenin elektron ilgisi, E_g yasak enerji aralığı ve Ψ_B ise Fermi enerji seviyesi (E_F) ile saf (intrinsic) enerji seviyesi (E_i) arasındaki farktır.

Yarıiletkende serbest yüklerin sayısı metale göre daha azdır. Bu yükler katkılama göre çoğunluk ya da azınlık taşıyıcıları olabilir. Hareketleri de uygulama gerilimine göre değişir. Termal denge durumunda arayüzeydeki uzay yükü miktarı voltajın büyüklüğüne bağlıdır. İdeal bir MIS yapıda metale voltaj uygulandığında yarıiletkende yük kaymaları meydana gelir ve yarıiletken arayüzeyinde bant bükülmelerine neden olan uzay yükü (Q_{sc}) oluşur. Yarıiletkendeki yükler metaldeki gibi serbest değildir. Uygulama voltajına bağlı olarak ya uzay yük bölgesinde ya da arayüzeyde yığılmalar meydana getirirler. V_G uygulama geriliminin bir kısmı yarıiletkenin üzerine düşerken geri kalanı yalıtkan tabaka üzerine düşer. Böylelikle burada;

$$V_G = V_{ox} - \Psi_s \quad (3.42)$$

eşitliği yazılabilir. Burada V_{ox} yalıtkan üzerine düşen gerilim, Ψ_s ise arayüzeydeki bant gerilimidir (Sze, 1981; Nicollian and Brews, 1982).

Yalıtkan ya da organik ara yüzey tabakanın varlığında metal ile yarıiletken tabaka arasında bir kapasitans meydana gelir. Bu kapasitans MIS kapasitansı olarak adlandırılır. Uygulanan gerilimde küçük diferansiyel değişimler için MIS kapasitansı C , yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ve uzay yükü kapasitansı C_{sc} olarak gösterilebilir. Bunların eşdeğeri bize MIS kapasitansını verir.



Şekil 3.15. MIS kapasitansının eşdeğer devresi

Şekil 3.15' deki eşdeğer devrenin çözümünde MIS kapasitansı aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_{sc}} + \frac{1}{C_{ox}} \quad (3.43)$$

Eşitlik (3.43)' de görüldüğü gibi MIS yapının eşdeğer kapasitansı C_{sc} ve C_{ox} kapasitanslarının seri bağlanmasıyla elde edilir. Yalıtkan tabakanın kapasitansı C_{ox} ise;

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{d_{ox}} A_{ox} \quad (3.44)$$

eşitliği ile elde edilir. Burada ϵ_{ox} yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti, d_{ox} ise yalıtkan tabakanın kalınlığıdır. Bu değerler voltajdan bağımsızdır. Dolayısıyla C_{ox} uygulanan voltajla değişmez. Şekil 3.15' den de görüldüğü gibi MIS yapının kapasitansındaki değişim sadece C_{sc} uzay yükü kapasitansı ile belirlenir (Sze, 1981; Nicollian and Brews, 1982).

3.8.1. Yığılma (Accumulation)

Metale pozitif kapı voltajı ($V_G > 0$) uygulandığında (n -tipi yarıiletken için) oluşan elektrik alan sonucunda yarıiletkenin çoğunluk yük taşıyıcısı olan elektronlar arayüzeye doğru birikirler. Şekil 3.16 (a)' da görüldüğü gibi yüzeye yakın bölgelerde bantlar yukarı doğru bükülür. Çoğunluk taşıyıcılarının arayüzeyde birikmelerinden dolayı bu duruma 'yığılma' adı verilir.

3.8.2. Tükenim (Depletion)

Metale negatif bir kapı voltajı ($V_G < 0$) uygulandığında (n -tipi yarıiletken için) ara yüzey tabakada oluşan elektrik alan yarıiletken arayüzeyinde bulunan elektronları yüzeyden uzaklaştırır. Ara yüzey bölgesinde ise geride bıraktıkları pozitif yükler (holler) kalır. Böylece yarıiletken yüzeyindeki elektron yoğunluğu, yarıiletkenin iç kısmındaki elektron yoğunluğundan küçük olmaya başlar. Şekil 3.16 (b)' de görüldüğü gibi enerji bantları (E_C ve E_V) aşağı doğru bükülür. Yarıiletkenin ön yüzeyinde, uygulanan gerilimle değişen elektronların azaldığı W_D genişliğinde bir 'tükenim' bölgesi oluşur. Bu bölgenin kalınlığı;

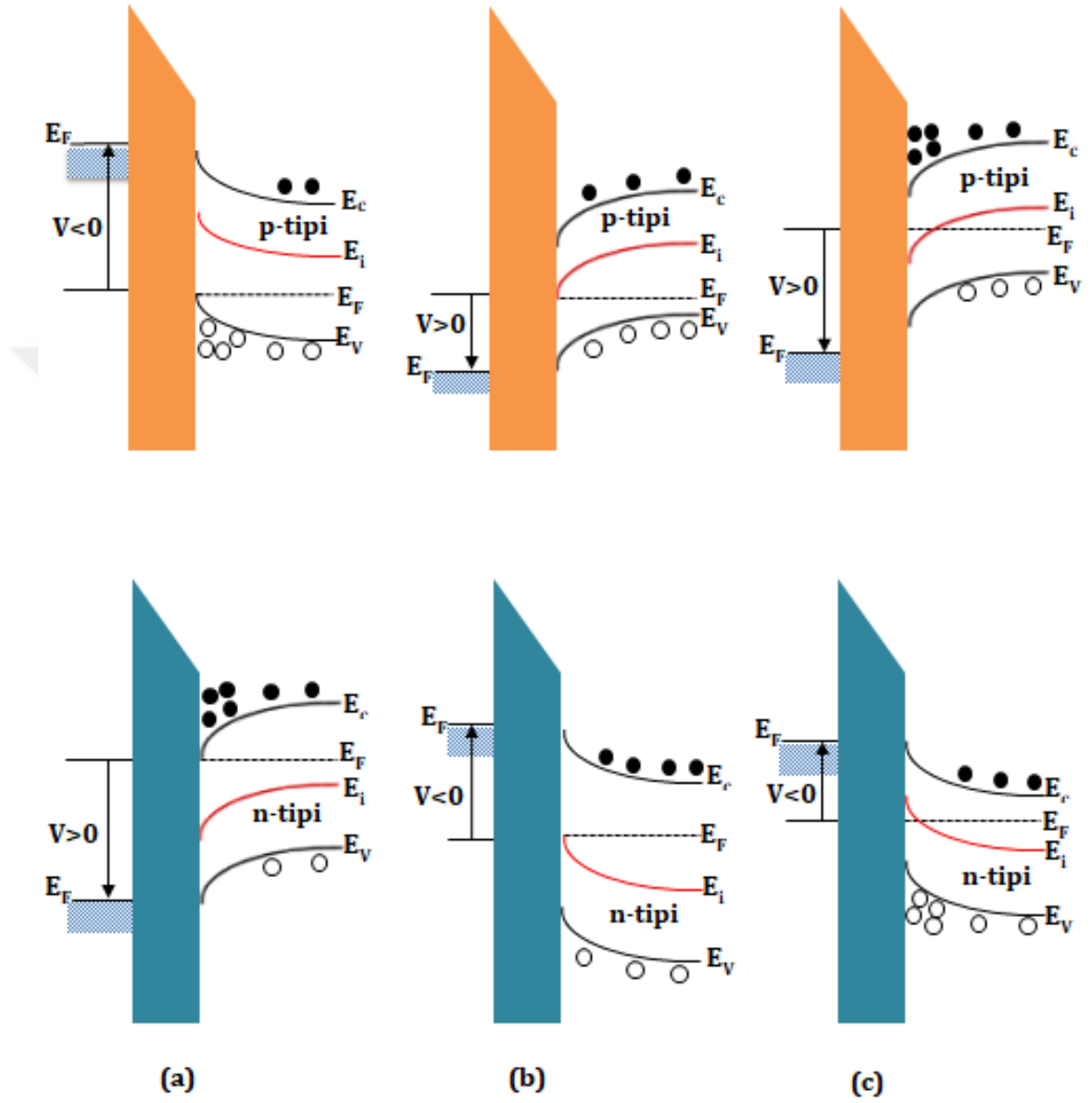
$$W_D = \varepsilon_s A_{ox} \left(\frac{1}{C} - \frac{1}{C_{ox}} \right) \quad (3.45)$$

ile ifade edilir. Burada ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitidir.

3.8.3. Tersinim (Inversion)

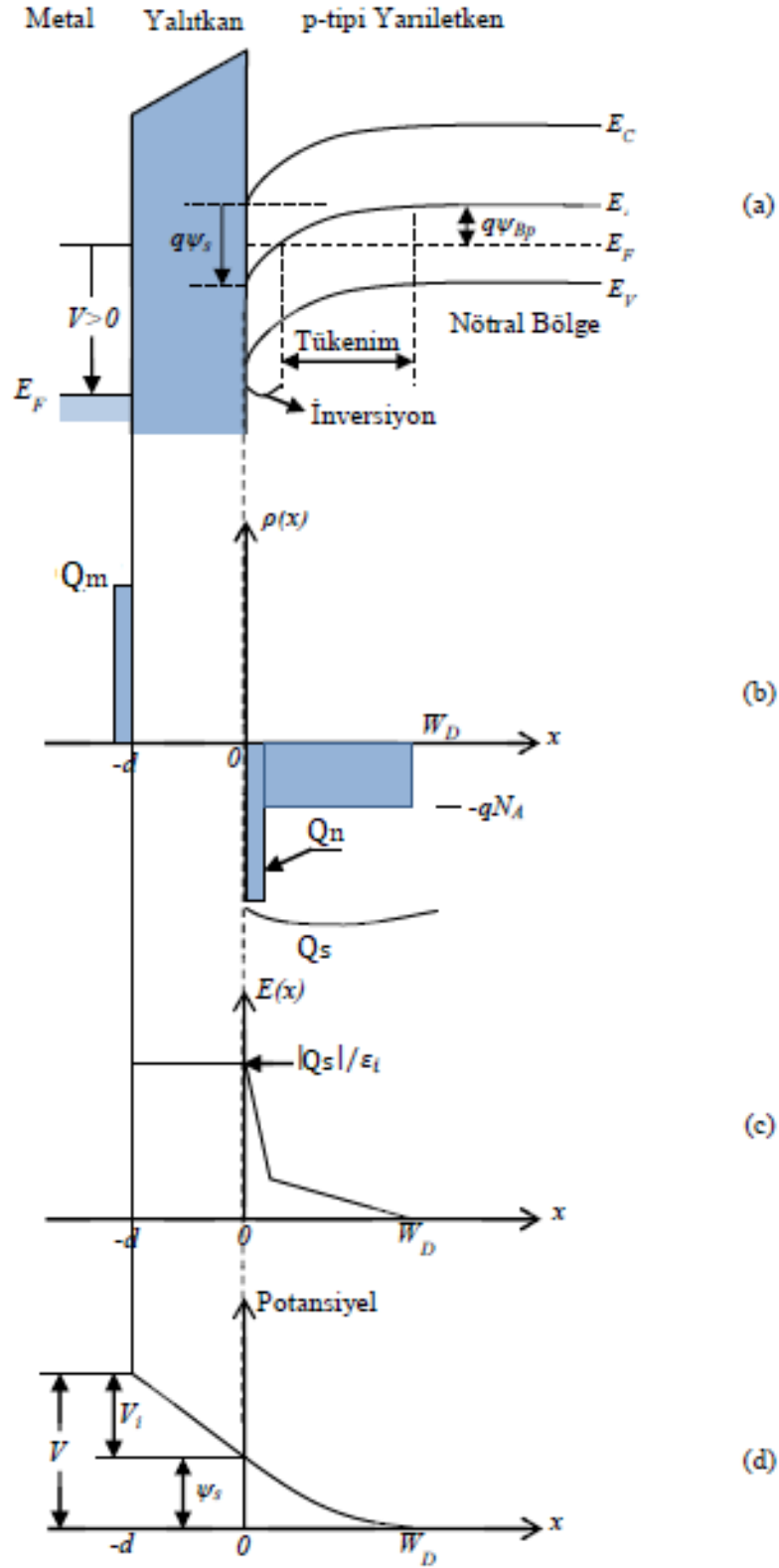
Metale daha fazla negatif voltaj ($V_G < 0$) uygulandığında (n -tipi yarıiletken için) bantlar daha fazla bükülür. Böylece yarıiletken ara yüzeyinde elektronların geride bıraktıkları azınlık taşıyıcı olan hollerin yoğunluğu iyice artar. Bir süre sonra holler çoğunluk taşıyıcı elektronların yoğunluğundan daha fazla olmaya başlar. Şekil 3.16 (c)' de görüldüğü gibi E_F, E_i' nin altına iner. Bu sebepten n -tipi yarıiletken yüzeyi p -tipi yarıiletken gibi davranmaya başlar. Bu olay yarıiletken yüzeyinin 'tersinimi' olarak adlandırılır. Böyle durumlarda MIS kapasitansının değeri elektron yoğunluğunun ac sinyalini takip edebilme yeteneği ile belirlenir. Küçük frekanslarda ac sinyali takip edilebilir. Kapasitansa ilave bir kapasitansla oksit kapasitans değerine ulaşılır. Orta büyüklükte frekanslarda takip yeteneği azalır ve ara frekans eğrileri görülür. Yeterince yüksek frekanslarda ise artık sinyal takip edilemez ve kapasitans minimum değerine ulaşır. Yüksek frekanslarda voltaj ani olarak değiştirilecek olursa azınlık taşıyıcılarının yeniden birleşme (rekombinasyon) hızına bağlı olarak tersinim yükleri daha geç birikir. Bu durum kapasitansın minimumun altında değer almasına sebep olur.

Benzer sonuçlar Şekil 3.16' dan da takip edilebileceği gibi p -tipi yarıiletken tabanlı malzemeler için de elde edilebilir. Bu durumda voltaj kutuplanması p -tipi yarıiletkenine göre değiştirilir.



Şekil 3.16. $V \neq 0$ durumunda, (a) yığılm, (b) tükenim ve (c) tersinim şartları için farklı beslemeler altında ideal MIS kapasitörlerin enerji-bant diyagramları (Sze ve Kwok, 2007)

3.8.4. İdeal MIS kapasitör eğrileri



Şekil 3.17. İdeal MIS kapasitörün, güçlü tersinim altında yarıiletken gövdeye bağlı, (a) bant diyagramı, (b) yük dağılımı, (c) elektrik alan dağılımı, (d) potansiyel dağılımı (Sze ve Kwok, 2007)

Şekil 3.17 (a), güçlü tersinimde yarıiletkenin bant bükülmesiyle Şekil 3.17' deki ideal MIS kapasitörün bant diyagramını göstermektedir. Yük dağılımı ise Şekil 3.17 (b)' de görülebilir. Sistemin yük nötrallığı için;

$$Q_m = -(Q_n + qN_A W_D) = -Q_s \quad (3.46)$$

eşitliği gereklidir. Bu eşitlikte Q_m metaldeki birim alan başına yükleri, Q_n tersinim bölgesinin yüzeyi yakınlarındaki birim alan başına elektronları, $qN_A W_D$ ise uzay yükü bölgesinde birim alan başına iyonize olmuş akseptörleri ifade eder. W_D tükenim bölgesi genişliğidir. Q_s ise yarıiletkendeki birim alan başına yük miktarını ifade etmektedir. Poisson denkleminin birinci ve ikinci derece integralleri alınarak elde edilen elektrik alan ve potansiyel de sırasıyla, Şekil 3.17 (c) ve Şekil 3.17 (d)' de gösterilmiştir.

İş fonksiyonu farklılığı bulunmaması durumunda, uygulanan voltaj kısmen yalıtkan ve kısmen de yarıiletken boyunca belirlenecektir. Böylece,

$$V = V_i + \Psi_s \quad (3.47)$$

eşitliği verilir. Burada V_i yalıtkan boyunca potansiyeli ifade eder ve Şekil 3.19 (c)' de görüldüğü gibi,

$$V_i = E_i d = \frac{|Q_s|d}{\epsilon_i} = \frac{|Q_s|}{C_i} \quad (3.48)$$

ile verilir

Sistemin toplam kapasitansı C , yalıtkan kapasitansının (C_i) ve tükenim tabakasının kapasitansının (C_D) seri birleşimidir.

$$C_i = \frac{\epsilon_i}{d} \quad (3.49)$$

$$C = \frac{C_i C_D}{C_i + C_D} \quad (3.50)$$

Verilen yalıtkan kalınlığı d için C_i değeri sabittir ve sistemin maksimum kapasitansına karşılık gelir. Ancak yarıiletken kapasitansı (C_D) sadece voltaja (veya Ψ_s) bağlı değildir. Aynı zamanda frekans ölçümlerinin bir fonksiyonudur.

İş fonksiyonu farklılığı olmaksızın ideal bir MIS kapasitörde düz bant $V=0'$ da meydana gelir. Bu durumda $\Psi_s = 0'$ dır. Tükenim durumu, $\Psi_s = 0$ ile $\Psi_s = \Psi_{B_p}$ aralığında yüzey potansiyeline karşılık gelir. Zayıf tersinim $\Psi_s = \Psi_{B_p}$ 'de başlar. Güçlü tersinim başlangıcı ise $\Psi_s = 2\Psi_{B_p}$ 'de olur.

3.9. Schottky Diyotların İdealden Sapma Nedenleri

Schottky ve benzeri yapılar karakterize edilirken temel olarak elektriksel, dielektrik, optik vb. parametreleri incelenir. Bu çalışma kapsamında bahsedilen elektriksel ve dielektrik parametrelerin hangi veriler ile hangi yöntem ve ya yöntemler kullanılarak elde edileceğinin kavranması için bu bölümde idealden sapma nedenleri üzerinde durulacaktır.

3.9.1. İmaj kuvvet (Schottky) etkisi

İdeal bir Schottky diyot için potansiyel engel yüksekliği ifadesi;

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (3.51)$$

ile verilir. Fakat bu Eşitlik (3.51) çeşitli nedenlerden dolayı değişime uğrayabilmektedir. Bunlardan biri imaj (görüntü) kuvvet etkisi nedeniyle engel yüksekliğindeki azalmadır. Metalden x kadar uzaklıktaki bir mesafede, yarıiletkendeki bir elektron çevresinde elektrik alan oluşur. Elektrik alan çizgileri metal yüzeyine diktir. Bu çizgiler metalin yüzeyinden iç kısma doğru x mesafesine yerleşmiş bir $(+q)$ imaj yükünün çizgileri ile aynıdır (Şekil 3.18 (a)). İmaj yükü ile Coulomb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etki eden kuvvet;

$$F = -\frac{1}{4\pi\epsilon_s} \left(\frac{q}{2x} \right)^2 = -qE \quad (3.52)$$

eşitliği ile verilir. Potansiyel ifadesi ise;

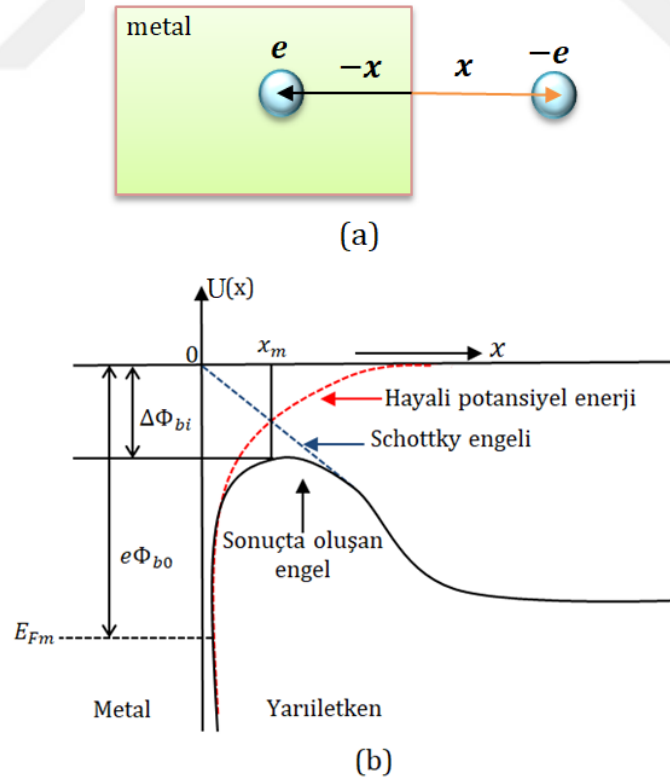
$$U(x) = + \int_0^{\infty} E dx = + \int_0^{\infty} \frac{q}{4\pi\epsilon_s 4(x)^2} dx = - \frac{q}{16\pi\epsilon_s x} \quad (3.53)$$

ile verilir. Burada x integral değişkeni olup potansiyel, $x = \infty$ için sıfır kabul edilmektedir. Elektronun potansiyel enerjisinin $-qU(x)$ değişimi başka herhangi bir elektrik alanının olmadığı düşünülerek Şekil 3.18 (b)' de gösterilmiştir.

Metal-yarıiletken arayüzündeki toplam potansiyele bu imaj potansiyelinin de katkısı olacağından toplam potansiyel ifadesi;

$$-U(x) = -\frac{q}{16\pi\epsilon_s x} - E \cdot x \quad (3.54)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir.



Şekil. 3.18. a) İmaj yükü b) Sabit bir elektrik alanda hayali kuvvetten dolayı potansiyel engelindeki bükülme (Schottky engelinin imaj yükü alçalması) (Rhoderick ve Williams, 1988)

Şekil 3.18 (b)' den de görüleceği gibi sabit bir elektrik alanda potansiyel engelin maksimum değeri azalmaktadır. Potansiyel engelinin bu şekilde azalması imaj-kuvvet etkisinden dolayı engel yüksekliğinin azalması olarak tarif edilir.

Değerin maksimum olduğu noktada toplam potansiyelin türevi sıfıra eşit olacaktır. Buradan yola çıkılırsa potansiyelin maksimum olduğu nokta için ;

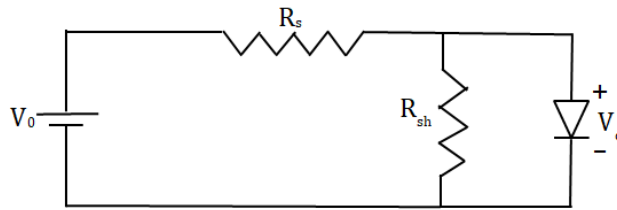
$$x_m = \sqrt{\frac{q}{16\pi\epsilon_s E}} \quad (3.55)$$

ifadesi elde edilebilir. Sonuç olarak imaj-kuvvet etkisinden dolayı Schottky engel yüksekliğinin azalması aşağıdaki gibi ifade edilir (Ziel, 1968);

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{qE}{4\pi\epsilon_s}} \quad (3.56)$$

3.9.2. Şönt direnci ve seri direnç

I-V ölçümleriyle çalışılan bir diyot dikkate alındığında diyot ile paralel bağlı olan dirence şönt direnci (R_{sh}), seri bağlı olan dirence ise seri direnç (R_s) denir. Şekil 3.21' de Schottky diyot eşdeğer devresi görülmektedir.



Şekil 3.19. Schottky eşdeğer devresi (Bengi, 2013)

Seri direnç, metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda yarıiletken tarafında oluşan uzay yükü bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir. R_s neden olduğu IR_s büyüklüğündeki voltaj düşmesi nedeniyle bir Schottky kontağın elektriksel karakteristiklerinin ideal durumdan sapmasına neden olan önemli faktörlerden biridir. İleri doğru beslem

bölgesinde akım değerleri daha büyük olacağı için bu bölgede daha büyük etkiye sahiptir. I-V eğrilerinin ileri doğru beslem bölgesinde bükülmeye uğramasındaki en önemli faktör olarak kabul edilir. Bu sebeple diğer elektriksel parametrelerin I-V verileri üzerinden hesaplanmasından önce R_s değerleri elde edilmeli ve hesaplamalar buna göre düzenlenmelidir. Bir Schottky bariyer diyodun seri direncinin farklı kaynakları olabilir. Bunlar;

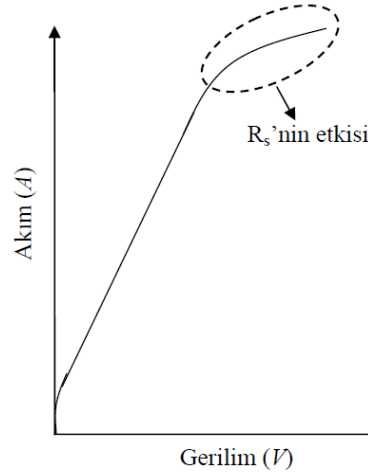
- ✓ Doğrultucu kontağın bir tel prop ile, arka kontağın ise yarıiletkenle doğrudan ohmik olarak kontak edilmesi,
- ✓ Metal ile yarıiletken arasında doğal ya da katkılanmış bir ara yüzey tabakasının olması,
- ✓ Alttaş ile ohmik kontak arasında büyütme sırasında ya da öncesinde oluşabilecek toz, kir vb. etkenler,
- ✓ Arka ya da doğrultucu kontak ile yarıiletken arasında quasi-nötral yarıiletken direnci ve yarıiletken yüzeyinde tükenim tabakasının kenar etkisi,
- ✓ Donor ve akseptör atomlarının aşırı katkılanması,
- ✓ Metal ve yarıiletken arasındaki ara yüzey durumlarının (N_{ss}) yoğunluk dağılımı (Nicollian and Brews, 1982).

Şönt direnci ve seri direnç elde edilmesinde kullanılan en pratik yöntem Ohm yasasının I-V verilerine uygulanmasıdır. Ohm yasasına göre Schottky bariyer diyodun uygulanan beslem voltajına bağlı direnci R_i ;

$$R_i = \frac{dV_i}{dI_i} \quad (3.57)$$

eşitliği ile verilir. Burada V_i ve I_i sırasıyla ilgili beslem voltajına karşılık gelen voltaj ve akım değerleridir. Buradaki V_i difüzyon potansiyeliyle karıştırılmamalıdır. Eşitlik (3.57)'deki akım ve voltaj değerleri yerine ölçüm alınan en ileri ters beslem ile ona karşılık gelen akım değerleri kullanılırsa, hesaplanan direnç değeri R_{sh} değeri olur. R_{sh} ne kadar büyük olursa üzerinden o kadar küçük akım geçer. Böylece akımın büyük bir kısmı diyot üzerine düşer.

Diğer taraftan en ileri doğru beslem değerlerinin kullanılmasıyla hesaplanan değer R_s değeri olacaktır (Şekil 3.20)



Şekil 3.20. Metal/yarıiletken kontaklarda seri direnç etkisi

Bahsedildiği gibi R_s etkisi yeterince yüksek voltaj değerlerinde baskın olmaya başlar. Bu durum diyot akımının artan pozitif voltajla azalmasına yani I-V eğrilerinde ileri doğru beslem bölgesinde bir bükülmeye neden olur. Şekil 3.20, bir Schottky diyota yüksek gerilim uygulandığı zaman seri direncin doyum etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir (Sharma, 1984). R_s değerinin elde edilmesine yönelik bir diğer yöntem ise Cheung-Cheung yöntemi (Cheung ve Chueng, 1986). Bu yöntemle önceki bölümlerde verilen modifiye edilmiş TE akım ifadesi olan Eşitlik (3.17)'deki V ifadesi yalnız bırakılacak şekilde denklemin, 'ln' fonksiyonu kullanılarak açılmasıyla aşağıdaki biçimde elde edilir;

$$\underbrace{V + n \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right)}_{H(I)} = n\Phi_{b0} + IR_s \quad (3.58)$$

Eşitliğin sol tarafı akıma bağlı bir $H(I)$ fonksiyonu halini alır. Ayrıca Eşitlik (3.58)'de V ifadesi yalnız bırakılacak şekilde açılır ve $\ln(I)$ 'ya göre türevi alınırsa son formu aşağıdaki biçime dönüşür.

$$\frac{dV}{d \ln I} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (3.59)$$

Bu iki eşitlikteki $H(I)$ ve $dV/d\ln(I)$ ifadeleri kullanılarak akıma göre grafiklerinin çizilmesi durumunda doğrunun eğimi R_s değerini verir. Ayrıca, R_s değeri aşağıda Eşitlik (3.60) ile verilen Nicolian ve Brews (1982)' in önerdiği admittans yöntemi ile de bulunabilir.

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (3.60)$$

Burada G_{ma} ve C_{ma} yığılım bölgesindeki iletkenlik (kondüktans) ve kapasitans değerleridir.

Bu çalışmada tercih edilmemekle birlikte, önceleri sadece $n=1$ durumu için hesaplanabilen ancak sonraları Sato ve Yasumura (1985) ($1 < n < 2$) ve Bohlin (1986)' in ($n > 1$) durumları için modifiye ettiği Norde yöntemi R_s değeri hesaplamasının bir diğer yolu olarak kullanılmaktadır (Norde, 1979).

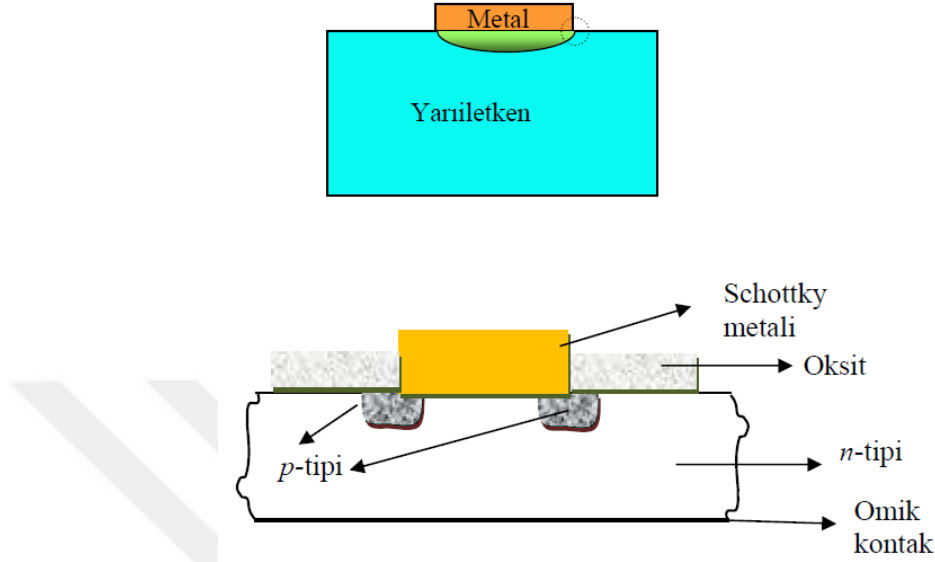
3.9.3. Tünelleme etkisi

Özellikle düşük sıcaklıklarda aşırı katkılanmış yarıiletkenlerle yapılan Schottky kontaklarda baskın olan mekanizmadır. Yük taşıyıcıları bu mekanizmada normal olarak engel üzerinden geçmeyip engeli kuantum mekaniksel tünellerler. Bu durum diyodun elektriksel karakteristiklerinin ideal durumdan sapmasına yol açar (Rhoderick ve Williams, 1988).

3.9.4. Kenar etkileri

Önceki bölümlerde metal ile yarıiletken arasında elektrik alan çizgilerinin yarıiletken eklemlere dik olduğu farz edilmiştir. Pratikte Schottky kontaklar, bir yarıiletken yüzeyine maskeler yardımıyla küçük metal noktalar (dotlar) yapılarak oluşturulmaktadır. Yapılan ölçümlerde metal noktanın kenarındaki elektrik alanın, merkezdeki alandan daha küçük olduğu tespit edilmiştir. Metal-yarıiletken kontaklarla yapılan çalışmalarda negatif voltajdaki akım değerlerinin teoride olması gerekenden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durumun kenar sızıntı akımı ile açıklanabileceği düşünülmüştür. Örneğin,

Schottky bariyer diyotlarda kenar etkisini yok etmek için n -tipi bir yarıiletken için p -tipi bölgeler oluşturulmak suretiyle Şekil 3.21’ de görüldüğü gibi guardlar (koruma yüzükleri) yapılmaktadır (Sze, 1981)



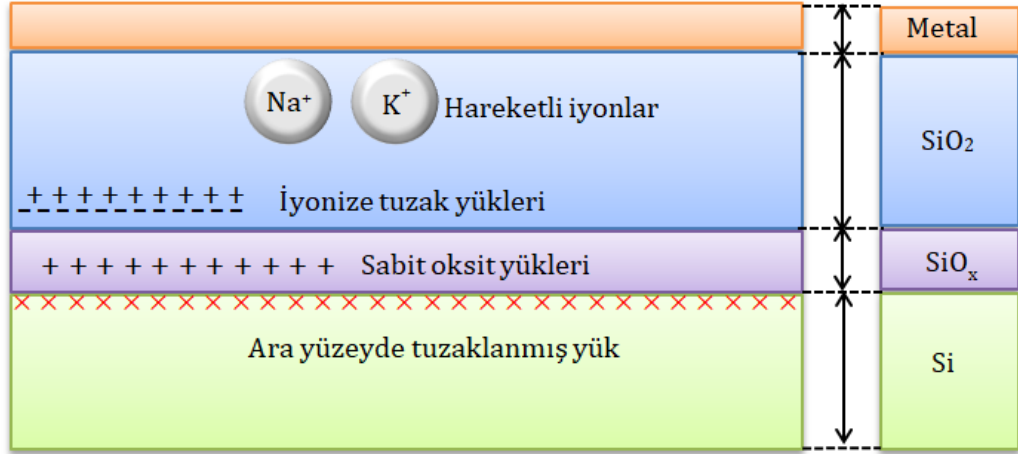
Şekil 3.21. Metal/yarıiletken kontaklarda kenar etkisi (Alialy, 2015)

3.9.5. Ara yüzey durumları (N_{ss})

İdealde bir yalıtkan içinde ve yalıtkan ile yarıiletkenin birleşim yüzeyinde hareketli yük yoktur. Ancak gerçek yapılarda bu bölgeler hiçbir zaman elektriksel olarak nötr olmaz. Ara yüzey durumları denilen bu yükler MIS ya da MPS yapıların özelliklerini ciddi oranda değiştirmekte ve idealden sapmalara neden olmaktadır (Sze, 1981). Bu durumların belli başlı çeşitleri şöyle sıralanabilir;

- I. Yarıiletken ve yalıtkanın arayüzeyinde bulunan ve yasak enerji aralığında izinli enerji seviyeleri gibi davranan ara yüzey durumları,
- II. Yarıiletkenin yüzeyine veya yakınına yerleşmiş olan ve uygulanan elektrik alanda hareketsiz duran sabit oksit yükleri,
- III. Numunenin x-ışını radyasyonuna maruz kalmasıyla oluşabilen iyonize tuzaklar.

Bu ara yüzey durumlarının ve yüklerin sınıflandırılması Şekil 3.22' de ayrıntılı gösterilmiştir (Kaya, 2013).



Şekil 3.22. İdeal olmayan SiO₂ ara yüzey tabakalı bir MIS yapıda ara yüzey durumları ve yüklerin sınıflandırılması (Sze ve Kwok, 2007)

Ara yüzey durumları, kısa bir zaman diliminde yarıiletkenle yük alışverişi yapabilen yarıiletken ile yalıtkan arayüzeyinde yasak bant aralığı içindeki girilebilir enerji seviyeleridir. Konağa bir voltaj uygulandığında tuzak seviyeleri, Fermi seviyesi sabit kalırken valans ve iletkenlik bantları ile aşağı ve yukarı hareket edebilir. Ara yüzey tuzaklarındaki yükün değişimi, tuzakların iletkenlik ve valans bandı ile yük alışverişi yapması sonucu meydana gelir. Bu değişim MIS kapasitansına katkıda bulunarak ideal MIS eğrisinde değişikliğe neden olur.

Ara yüzey durumları, uzay yükü kapasitesine ek bir kapasite ve direnç etkisi oluşturur. Bunlar alıcı veya verici tipte olabilir. Alıcı tipte, enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüz; verici tipte ise, enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür.

Ara yüzey durumlarının elektriksel etkileri şöyle özetlenebilir;

- **Kapasite:** Bir ara yüzey durumuna izin verilen başka bir ara yüzey durumunun eklenmesiyle oluşur. Bu ek, durum başına temel yükün

kapasitesidir. Bu kapasite uygulanan gerilimin keskin bir pikidir. Bu pik, Fermi seviyesi ara yüzey durum seviyesini aştığı için görülür.

- İletim: Ara yüzey durumları tarafından taşıyıcıların yayınlanması ve yakalanması sonsuz hızda olmadığından zaman gecikmesi ile birleştirilir. Bu zaman gecikmesi ara yüzey durumunun bir RC devresiyle özdeşleştirilmesiyle ifade edilir. Bu zaman kayması aynı zamanda dolma-boşalma zamanıdır. $\tau = 1/(R_{ss}C_{ss})$ bağıntısı ile verilir. Burada R_{ss} ara yüzey direncidir (Kaya, 2013).

Devredeki ara yüzey kapasitansı aşağıdaki Eşitlik (3.61) ile verilir;

$$C_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_{ss}} A_{ox} \quad (3.61)$$

- Ara yüzey potansiyeli: Yukarıdaki cümlelerde ifade edilen kapasite ve iletim *a.c.* etkisindedir. Ara yüzey durumları bunlara ek olarak bir de *d.c.* etkisine sebep olur. Ara yüzey durumlarında depo edilmiş yük, ara yüzey elektrik alanını değiştirir. Ara yüzey durumları mevcutken ara yüzey potansiyelini değiştirmek için ideal durumdan daha fazla gerilim uygulanması gerekmektedir. Bu etki kapasite ve gerilimin zorunlu genişlemesi (stretch out) şeklindedir.

Ara yüzey durumları, C-V eğrisinin ideal C-V eğrisinden kaymasına neden olur. Ara yüzey durumlarının birim enerji ve alan başına durum yoğunluğu;

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} \quad (3.62)$$

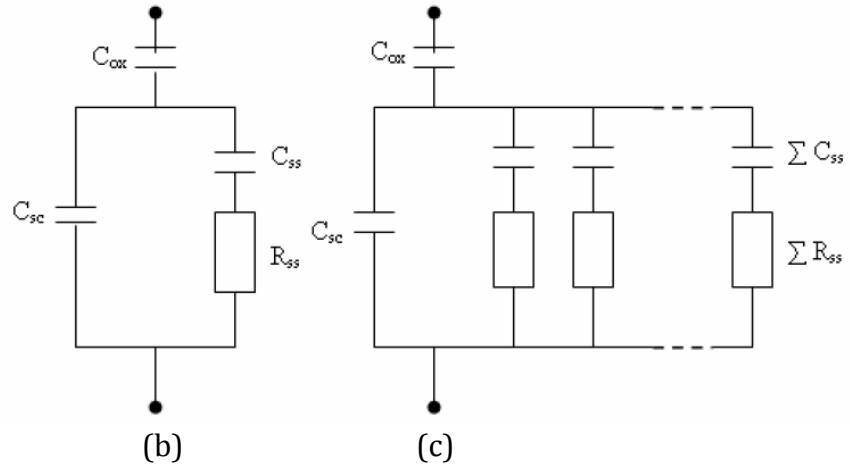
ile verilir. Yani bu ifade birim enerji başına birim ara yüzey durum yükü olarak tanımlanır. Burada E enerji olup $E = q\psi_s$ ile verilir. E' nin diferansiyeli alınırsa $dE = qd\psi_s$ elde edilir. Bunu Eşitlik (3.62)' da yerine koyup tekrar düzenlediğimizde durum yoğunluğu;

$$N_{ss} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial E} = \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \frac{\partial \psi_s}{\partial E} = \frac{1}{q} \frac{\partial Q_{ss}}{\partial \psi_s} \quad (3.63)$$

şeklini alır. Ara yüzey durumlarında bulunan Q_{ss} yük yoğunluğu yarıiletken katkı yoğunluğu ve oksit kalınlıklarından etkilenmez.

Bir elektron veya deşik tarafından ara yüzey durumunun işgal edilme olasılığı, yüzey durumunun safsızlık enerji seviyelerindeki gibi Fermi seviyesiyle belirlenir. Bu şekilde yüzey potansiyeli değiştikçe ara yüzey durumunun enerji seviyesi de onunla hareket eder. Sonuçta Fermi seviyesinin bu bağlı değişikliği bir elektron tarafından ara yüzey durumunun işgal edilme olasılığının değişimine neden olur.

Ara yüzey durumları, uzay yükü kapasitansına paralel kapasitans ve seri direnç etkisi yaptığında temel eşdeğer devre Şekil 3.23' de verildiği gibidir (Rhoderick ve Williams, 1988; Kaya, 2013).



Şekil 3.23. MIS yapısının eşdeğer devresi a) bir enerji seviyesi için, b) birbirinden farklı enerji seviyeleri için (Rhoderick ve Williams, 1988)

Şekil 3.23' de görülen ideal olmayan MIS yapıda ara yüzey durumlarını ve yüklerini kısaca açıklayacak olursak;

- ❖ Sabit oksit ve ara yüzey yükleri: Sabit oksit yükleri yalıtkan ile yarıiletken arayüzeyinde bulunur. Oksidasyona, tavlama şartlarına ve yarıiletkenin yönüne bağlıdır. Yalıtkanla

yarıiletkenin kristal yapısının farklı olmasından dolayı oksidasyon esnasında yarıiletken tabakadan yalıtkan tabakaya geçerken kaçınılmaz olan kristal bozuklukları yerel yüklere neden olur. Arayüzeyde pozitif veya negatif sabit oksit yükleri olduğunda yüksek frekans C-V eğrilerinde gerilim eksenini boyunca değişimler meydana gelir. Elektriksel ölçümlerde sabit oksit yükü, yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde tabaka halinde yerleşmiş yükler gibi görülebilir. *N*-tipi ve ya *p*-tipi yarıiletkenler için, C-V eğrisinin uygulama geriliminin negatif değerlerine doğru kaymasına pozitif sabit oksit yükleri ($+Q_f$), ileri pozitif uygulama gerilimine doğru kaymasına da negatif sabit oksit yükleri ($-Q_f$) sebep olur (Goetzberger vd., 1976). Pozitif uygulama gerilimleri için hareketli iyonlar yalıtkan-yarıiletken arayüzeyine sürüklenirler. Negatif uygulama gerilimleri için hareketli yük metal-yalıtkan arayüzeyine çekilir.

❖ Hareketli iyonlar: Hareketli yükler ya metal-yalıtkan arayüzeyinde ya da yarıiletken-yalıtkan arayüzeyinde bulunurlar. Bu iyonlar genellikle Na^+ , K^+ , Li^+ , H^+ , H_3O^+ iyonlarıdır (Schroder, 1998). Böyle iyonlar düşük sıcaklıklarda oksit içinde hareketli olduklarından sürüklenme olabilir. Hareketsiz oksit yükü, beslem sıcaklığı ile hareketli iyonik yükten ayırt edilebilir. Hareketli iyonlar, kullanılan kimyasal maddelerin bu iyonları içinde bulundurması, mekanik parlatma esnasında çıplak elle temas, oksitleme fırını, kuartz tutucuların kirli olması ve oksitleme gazlarında bulunan safsızlıklar yüzünden oksit içinde yer alabilirler. Bu yükler uygulanan elektrik alanda hareket ettiklerinden MIS yapısının kararlılığını büyük ölçüde bozarlar.

❖ İyonlaşmış tuzaklar: Kimyasal yapı bozukluklarından ve radyasyondan kaynaklanan bu tuzaklar yalıtkan tabaka içinde bulunurlar. Yarıiletken arayüzeyi ile yük alışverişi yaparlar. Böylece yalıtkan ve yalıtkan-yarıiletken arayüzeyinde ilave bir yük oluştururlar. Bir yalıtkan tabakada iyonlaştırıcı radyasyon etkisiyle elektron-deşik çiftleri meydana gelmişse bu elektron ve

deşiklerin bir kısmı sonradan oksitte tuzaklanabilir. Yapının üretiminde ortaya çıkan elektron vedeşik tuzakları daha sonradan tavlamaıyla giderilebilir. Oksitte tuzaklanmış yük, yalıtkana doğru dağıldığından genellikle yalıtkan-yarıiletken yüzeye yerleşmez (Schroder, 1998). İyonlaşmış tuzaklar elektron yakalayarak yüksüz hale geçer. Bu tuzaklar C-V eğrisine etki ederler. Gerilimi negatif değerlerden pozitif değerlere doğru arttırırken ölçülen kapasitans değerleriyle; gerilimi pozitif değerlerden negatif değerlere doğru arttırırken ölçülen kapasitans değerleri arasında farklılıklar meydana gelir (Hofstein ve Warfield, 1965). C-V eğrisinin her iki yönde ölçülen C değerlerindeki kayma miktarı yalıtkan içindeki tuzakların miktarını verir (Kaya, 2013).

3.9.6. Tükenim bölgesi jenerasyon-rekombinasyon etkileri

Tükenim bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon etkileri termoiyonik emisyon akım iletim mekanizması bileşenine paralel bir artış gösterir. Bu artış özellikle orta sıcaklık bölgesinde önemli bir mekanizmadır (Rhoderick ve Williams, 1988). Uzay yükü bölgesindeki rekombinasyon etkisi Yu vd. (1986) çalışmasında ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Schottky bariyer diyotlarda jenerasyon-rekombinasyon etkili durumlardaki akım iletim mekanizması $p-n$ eklem diyodun akım iletim mekanizmasına benzemektedir. Sah vd. (1957) çalışmasında doğru beslemdeki küçük gerilim bölgesinde baskın olan rekombinasyon akım yoğunluğunun yaklaşık olarak;

$$J_r = J_{r0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (3.64)$$

ile verilebileceğini göstermişlerdir. Burada $J_{r0} = qn_i w / 2\tau_r$ değerine eşittir. Bu ifadede yer alan n_i asal elektron konsantrasyonu, w deplasyon tabakasının genişliği ve τ_r elektronların bu bölgeye geçmesi için gerekli zamandır.

Rekombinasyon mekanizmasının tam tersi işlem olan jenerasyon olayı deplasyon bölgesinde elektron-boşluk çiftlerinin meydana gelmesidir. Ters beslem durumunda ortaya çıkar.

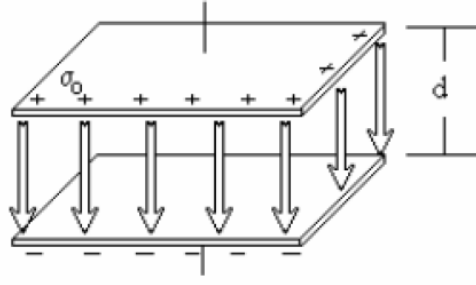
J_g , jenerasyon mekanizmasıyla oluşan akım olup; $J_g = qn_i w / 2\tau_r$ ifadesi ile verilir. Deplasyon bölgesinin genişliği uygulanan ters beslem ile orantılı olduğu için jenerasyon akımı ters beslem gerilimi arttıkça artar. Düşük sıcaklıkta etkisi daha fazladır. Çünkü termoiyonik emisyon bileşeninden daha düşük aktivasyon enerjisine sahiptir.

3.10. Dielektrik Özellikler

Dielektrikler (yalıtkanlar), dış elektrik alan etkisi altında elektriksel iletkenliği sağlayacak kadar serbest taşıyıcıya sahip olmamalarından dolayı iletkenlerden ayrılır. Bu maddelerde serbest yük taşıyıcılarının yoğunluğu 10^{13} cm^{-3} ün altındadır. Dielektriklerde yükler belli atom ve moleküllere bağlı olduğundan hareketleri de molekül içinde sınırlıdır. Diğer taraftan bu yükler elektrik alan etkisi altında kutuplanma (polarizasyon) özelliğine sahiptir. Dielektrik madde, elektrik alana maruz kaldığında içerisindeki pozitif ve negatif yükler oluşan elektrostatik kuvvet altında zıt yönlerde küçük yerdeğiştirmeler yapar. Bu olayın sonucunda da dipol momentler oluşur. Elektrik alanın etkisi ortadan kalktığında yükler eski konumlarına döner. Net dipol moment tekrar sıfır olur. Dielektriklerin elektriksel özellikleri genellikle dielektrik sabitleri cinsinden ifade edilir. Çoğunda bu dielektrik sabiti elektrik alan şiddetinden bağımsızdır. Eğer ortamda değişen bir elektrik alan söz konusu olursa bu değer sıcaklık ve frekanstan etkilenir.

3.10.1. Dielektriksiz ve dielektrikli paralel plakalı kondansatör

Aralarında d uzaklığı bulunan A yüzey alanına sahip iki paralel plakalı kondansatör Şekil 3.24' da gösterilmiştir.



Şekil 3.24 Dielektriksiz paralel plakalı kondansatör (Ataseven, 2011)

Plakalardan birinin yükü $+Q$, diğerininki $-Q$ alınarak arasına bir dielektrik madde konursa yüklerin bir plakadan diğerine geçişi sınırlanır ve bu plakalar bir üretcin uçlarına bağlanacak olursa kondansatör kolaylıkla yüklenebilir. Plakalar arasında oluşan elektrik alan şiddeti;

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (3.65)$$

ile ifade edilir. Burada σ her plaka üzerine birim alan başına düşen yüzey yük yoğunluğu, ϵ_0 ise boşluğun geçirgenlik sabitidir. Aralarında d uzaklığı bulunan plakalar arasındaki potansiyel fark;

$$V = E \cdot d \quad (3.66)$$

ile verilir. Buradan hareketle her plakanın sahip olduğu toplam yük σA dır. O halde paralel plakalı kondansatörün sığası ;

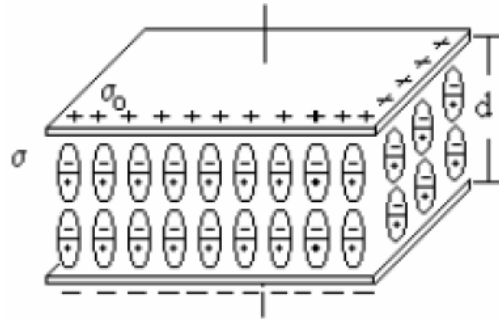
$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (3.67)$$

olarak ifade edilir. Plakalar arası bölgede elektriksel yerdeğiştirme kaynağı olarak σ yüzey yük yoğunluğu düşünülebilir. Buna göre elektriksel yerdeğiştirme;

$$D = \sigma = \epsilon_0 E \quad (3.68)$$

ile verilir (Oral, 1983; Tareev, 1979; Von Hippel, 1959; Fröhlich, 1958; Neamen, 1997).

Eğer kondansatörün plakaları arasındaki boşluk tamamen dielektrik bir madde ile doldurulursa, kondansatörün sığası birimsiz ϵ' çarpanı (dielektrik sabiti) kadar artar. Bu sabit daima boşluğun geçirgenlik sabiti (ϵ_0) cinsinden ifade edilir. Birden büyük bir sayıdır.



Şekil 3.25 Dielektrikli paralel plakalı kondansatör (Ataseven, 2011)

Plakalar arasında dielektrik madde yokken kondansatörün sığası C_0 , kondansatörün uçları arasındaki potansiyel farkı V_0 , elektrik alan da E_0 olsun.

$$V = \frac{V_0}{\epsilon'} \quad (3.69)$$

Plakalar arasına dielektrik bir madde konulursa potansiyel farkı ve elektrik alan $1/\epsilon'$ çarpanı kadar azalır. O halde elektrik alan ifadesi de;

$$E = \frac{E_0}{\epsilon'} \quad (3.70)$$

olacaktır. Kondansatör üzerindeki Q yükü değişmez ancak sığanın değeri ϵ' çarpanı kadar artar. Yani;

$$C = \frac{Q_0}{V} = \frac{\epsilon' Q_0}{V_0} = \epsilon' C_0 \quad (3.71)$$

olur. Plakalar arasındaki bölge dielektrik maddeyle dolduğunda kondansatörün sığası;

$$C = \frac{\epsilon' \epsilon_0 A}{d} \quad (3.72)$$

olarak ifade edilebilir. Plakalar arasına yerleştirilen dielektrik materyalin dielektrik sabiti ne kadar yüksek olursa sığa da o ölçüde artacaktır.

3.10.2. Dielektrik kutuplanma

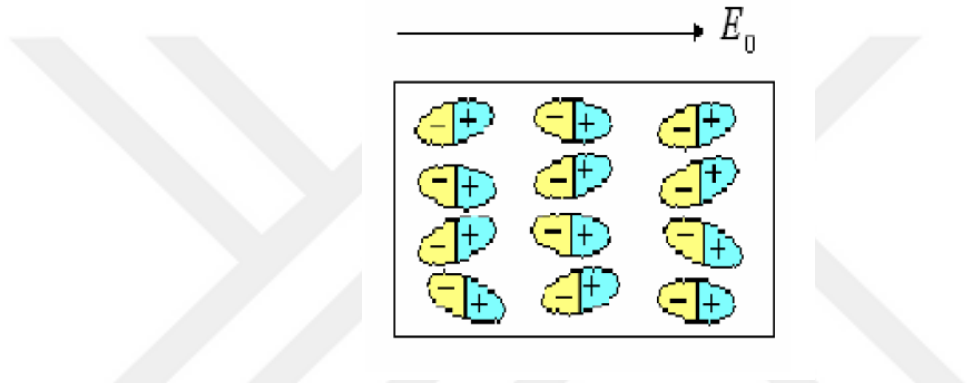
Kondansatörün levhaları arasına dielektrik malzeme yerleştirildiğinde potansiyelin azalması elektrik alan şiddetinin ($E=V/d$) azalması anlamına gelir. Elektrik alan şiddetindeki ($E = \sigma/\epsilon_0$) bu azalma birim yüzeydeki net yükü de azaltacaktır. Bu durum ancak dielektriğin levhalara bakan yüzeylerinde zıt işaretli yüklerin meydana gelmesi ile mümkün olur. Elektrik alan içerisine yerleştirilen iletkendeki serbest yükler alan tarafından uygulanan kuvvetlerin etkisi ile yer değiştirir. Etki sonucu kutuplanan yüklerin elektrik alanı elektrostatik denge kurulduğunda dış alanı nötrleştirir. Sonuçta iletken içinde elektrik alan sıfır olur (Oral, 1983; Tareev, 1979; Von Hippel, 1959).

Kondansatör arasına konulan dielektriğin kondansatörün levhalarına karşı olan yüzeylerinde yükler birikir. Dielektrik malzemelerin bazıları daimi dipol ihtiva ederler. Polar (kutuplu) denilen bu maddelerde pozitif ve negatif yüklerin ağırlık merkezleri çakışmaz, dolayısıyla yükler birbirinden çok az ayrılır. Polar moleküllere örnek olarak H_2O ve N_2O verilebilir. Her iki molekülde de hidrojen ve azot atomları oksijen atomunun aynı tarafında yer alır. H_2 , N_2 ve O_2 gibi simetrik moleküller ise polar olmayan moleküllere örnek olarak verilebilir. Bu moleküllerde pozitif çekirdeğin ağırlık merkezi elektronların ağırlık merkezi ile çakışır.

Elektrik alana yerleştirilen dielektrik içerisinde yük hareketi olmamakla birlikte elektronlar ait oldukları atomun çekirdeğine doğru çok küçük bir yerdeğiştirme yaparlar. Atomlar çok küçük dipoller haline geçerek dielektrik kutuplanırlar.

Böylece dipolar hale geçen molekülün dipol momenti elektrik alana paralel olacak şekilde yönelir. Elektrik alan kaldırıldığında atomlar tekrar eski haline döner yani dipoller kaybolur.

Polar olmayan molekül kutuplandığı zaman yer değiştiren yükleri geri çağıran kuvvetler oluşur. Dış alan tarafından yüklere etkiyen kuvvet, bu geri çağırıcı kuvvete eşit oluncaya kadar yükleri birbirinden ayırır. Moleküller sabit bir uyarım içinde bulunduklarından tam bir yönelim olmaz. Uygulanan elektrik alanın şiddeti arttıkça ve sıcaklık azaldıkça yönelme derecesi artar (Oral, 1983).



Şekil 3.26. Dış elektrik alan etkisi altındaki dipollerin yönelimleri (Ataseven, 2011)

Dielektrik, daimi dipollerden (polar moleküllerden) meydana gelmişse dış alan olmadığında rastgele doğrultularda yönelirler. Şekil 3.26' de bir dış elektrik alan etkisi altında P dipol momentlerinin alana paralel yönelimleri görülmektedir (Tareev, 1979). Kısmen yönelen bu dipoller, dış elektrik alana karşı koyan zıt yönlü bir iç elektrik alan meydana getirir. Eğer dielektriğin molekülleri daimi dipol momente sahip değilse dış elektrik alandan dolayı bir miktar yük ayrışması meydana gelir. Bu da dış elektrik alanın bir miktar azalmasına neden olur.

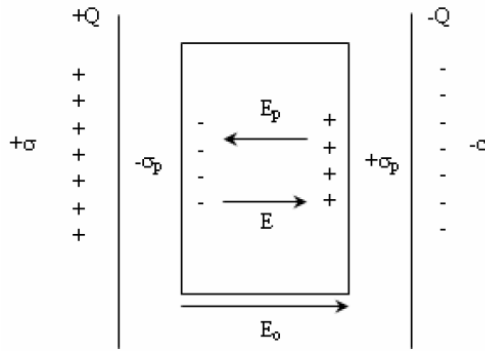
3.10.2.a. Kutuplanma yükleri

Dielektrik malzeme kondansatör levhaları arasındayken oluşan kutuplanma, tüm dielektrik maddenin pozitif yüklerinin merkezini negatif yüklerin merkezinden uzaklaştıracak yönelimdedir. Dielektrik bütün olarak yük

bakımından nötr olmakla beraber polarize olmuştur. Bu durum dielektriğin, kondansatörün levhalarına bakan yüzlerinde zıt işaretli yük meydana gelmesi anlamı taşır. Dielektriğin içindeki herhangi bir hacim elemanında yük fazlalığı yoktur. Dielektrik bütün olarak elektrik bakımından nötr ise yüzeyde meydana gelen kutuplanma yükleri eşit olmalıdır. Burada dielektrik malzemenin, kondansatörün levhalarına bakan yüzlerindeki yükler çok ince bir tabaka halindedir. Bu yükler yakın atomların etkisi altındadır ve 'bağlı yükler' olarak adlandırılır. Çünkü dielektriğin yüzeylerine dokundurulan iletken bir levha ile bu yüzeylerden hiçbir yük kaldırılamaz. Bir iletken serbest yükler bulunduğu halde polarize bir dielektrikte meydana gelen yükler bağlıdır (Tareev, 1979; Oral, 1983).

3.10.2.b. Kutuplanma yüklerinin alanı

Dielektrik malzemenin kondansatörün levhalarına bakan yüzlerindeki kutuplanma yükleri sebebiyle levhalar üzerindeki serbest yüklerden oluşan alana ters yönde bir akım meydana gelir. Bu durum Şekil 3.27' de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Dielektrik üzerindeki kutuplanma yük yoğunluğu

Şekil 3.27' de görüldüğü gibi düzgün bir $\vec{E}_0$ elektrik alanı içindeki dielektrik malzemede pozitif yükler alan yönünde negatif yükler ise alana zıt yönde yönelir. Uygulanan elektrik alan dielektriği polarize etmiş, negatif yükler sol yüzeyde pozitif yükler sağ yüzeyde birikmiştir. Dielektrik malzemenin tümüyle nötr kalmasından dolayı negatif yüzeyde oluşan yük miktarı ile pozitif yüzeyde oluşan yük miktarı birbirine eşittir.

Burada polarize yüklerden ileri gelen alan $\vec{E}_p$ ile gösterilecek olursa bileşke elektrik alan polarize eden $\vec{E}_0$ alanı ile bu alanın vektörel toplamına eşit olacaktır.

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_p \quad (3.73)$$

Burada polarize eden alan ile polarize yüklerden ileri gelen alan zıt yönlü olduğu için Eşitlik (3.74) şu şekilde yazılabilir;

$$\vec{E} = \vec{E}_0 - \vec{E}_p \quad (3.74)$$

$\vec{E}_p$ alanı kutuplanmayı önlemeye çalışan alandır. Bileşke alan daima $\vec{E}_0$ yönündedir. Kondansatörün levhaları üzerindeki serbest yük yoğunluğu σ , dielektriğin levhalara karşı olan yüzeylerinde meydana gelen kutuplanma yük yoğunluğu σ_p ise, etkin yük yoğunluğu $(\sigma - \sigma_p)$ olur. Serbest yük yoğunluğu σ , $\vec{E}_0$ elektrik alanına,

$$E_0 = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (3.75)$$

ile bağlıdır. Kutuplanma yük yoğunluğu σ_p ise $\vec{E}_p$ elektrik alanına;

$$E_p = \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} \quad (3.76)$$

bağıntısı ile verilir. Bu durumlar göz önünde bulundurularak dielektrik içindeki bileşke alan;

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} - \frac{\sigma_p}{\epsilon_0} \quad (3.77)$$

şeklinde elde edilir. Dielektriğin her noktasında P kutuplanması, elektrik alanı ile aynı yönde ve doğru orantılıdır. Bu özellik lineer ve homojen izotropik dielektrikler için,

$$P = \varepsilon_0 \chi E \quad (3.78)$$

bağıntısıyla ifade edilir. Burada χ , dielektriğin elektrik alınganlığıdır. Boşlukta polarize olacak madde olmadığı için $\chi = 0$ olur.

$$\chi = (\varepsilon' - 1) \quad (3.79)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Kutuplanma etkisi, dielektrik yüzeyde bulunan yüklerin iletken olduğu gibi serbestçe hareket edemeyip yer değiştirmesiyle anlaşılır (Oral, 1983; Ataseven, 2011).

Polarize dielektrikler için, D elektrik yerdeğiştirme (elektrik akı yoğunluğu) dielektrik içindeki elektrik alanı ile orantılıdır. D elektrik yerdeğiştirme;

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (3.80)$$

ifadesi ile verilir. Eşitlik (3.78), Eşitlik (3.80)' de yerine yazılırsa;

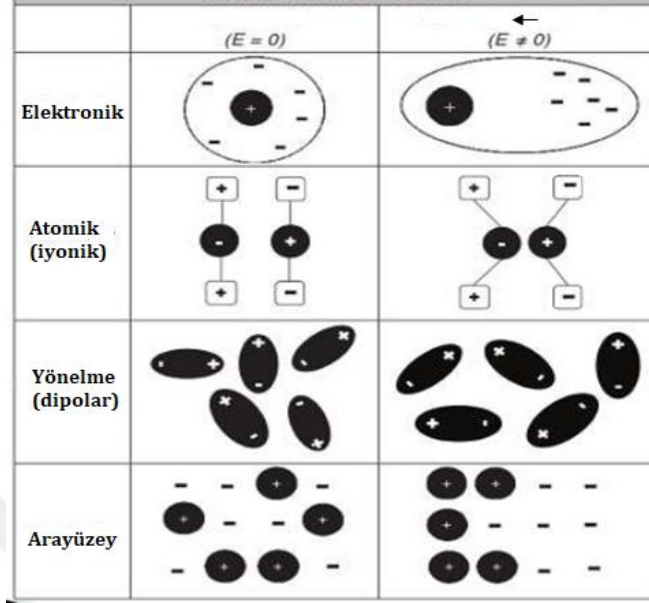
$$D = \varepsilon_0 (1 + \chi) E = \varepsilon_0 \varepsilon' E \quad (3.81)$$

olarak elde edilir (Oral, 1983; Tareev, 1979; Von Hippel, 1959; Fröhlich, 1958).

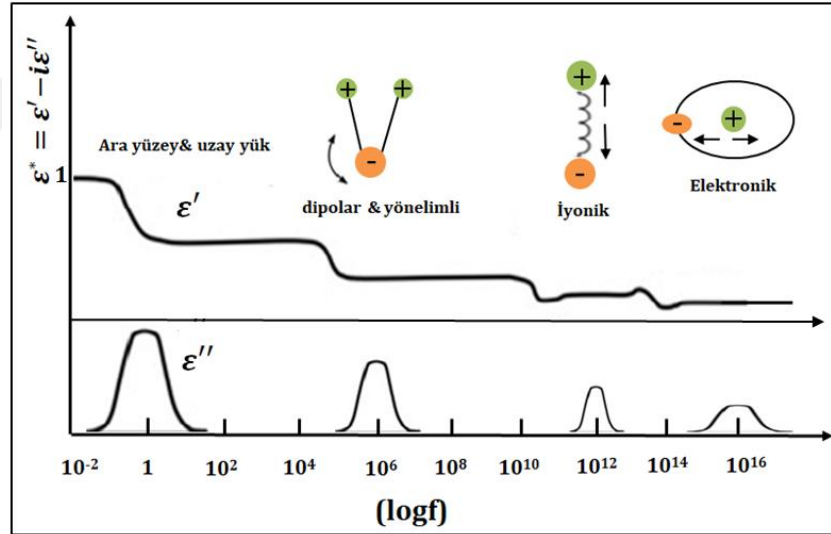
3.10.3. Kutuplanma mekanizmaları

Dielektrikler polar ve polar olmayan olmak üzere genelde iki kısma ayrılır. Polar olanlar moleküllerindeki atomların konumlarından dolayı pozitif ve negatif iyonların yük merkezleri bir noktada çakışmadığı için kalıcı elektrik dipol momentlerine sahiptir. Bu elektrik dipol momentleri çoğu zaman çift kutup (dipolar) momentleridir. Bu yüzden bunlara çift kutuplu denir. Dielektriklerde temelde dört tip kutuplanma meydana gelmektedir. Bunlar elektronik, iyonik, yönelme ve ara yüzey uzay yük kutuplanmalarıdır (Von-Hippel, 1959; Popescu ve Bunget, 1984). Bu mekanizmaların genel şematik

gösterimi Şekil 3.28 (a)' da (Gupta ve Leong, 2008), frekans aralığına bağlı değişimi ise Şekil 3.28 (b)' de (Ataseven, 2011) verilmiştir.



(a)



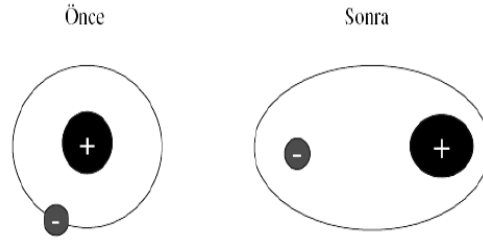
(b)

Şekil 3.28. a) Dielektrik kutuplanma mekanizmalarının şematik gösterimi
b) Dielektrik kutuplanma mekanizmalarının frekans aralığına bağlı değişimi

3.10.3.a. Elektronik kutuplanma

Elektrik alanın uygulanmasıyla tüm atom ve iyonlarda ortaya çıkar. Bütün dielektriklerde diğer kutuplanma türleri oluşmasa bile gözlenebilir. Nedeni, dış elektrik alanının etkisiyle bir atomdaki elektronların oluşturduğu negatif yük

dağılımı merkezinin çekirdeğin yük merkezine göre atomik ölçekte kaymasıdır. Şekil 3.29' da görüldüğü gibi bu kayma, elektronun kütlesinin oldukça küçük olmasından dolayı uygulanan dış elektrik alan etkisiyle 10^{-15} sn gibi kısa bir sürede gerçekleşir.

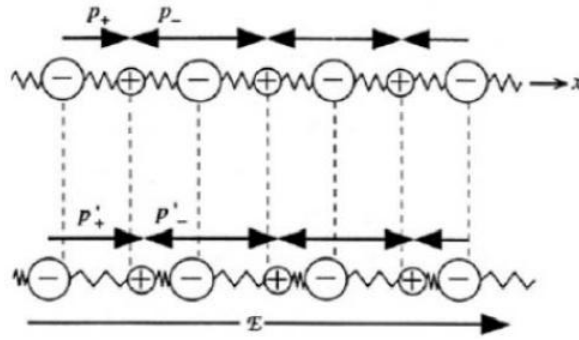


Şekil 3.29. Elektronik kutuplanma (Ataseven, 2011)

İyonik yapılı olmayan dielektriklerde sadece elektronik kutuplanma oluşur. Polar olmayan bu maddelerin optik kırılma indislerinin karesi dielektrik sabitine eşittir ($n^2 = \epsilon$). Bu eşitliğe 'Maxwell ilişkisi' denmektedir. Bu ilişkinin fiziksel anlamı şöyle açıklanabilir; elektromagnetik dalganın elektrik alan vektörü madde içindeki yüklere başlangıç konumlarını değiştirecek kuvvet uygular. Sonuçta bir çift-kutup meydana gelir. Sıkı bağlı elektronlar, oluşan bu kutuplanmaya daha az katkıda bulunur. Elektromagnetik dalganın elektrik alan vektörü devamlı değiştiğinden elektronlar bu değişimi izleyebildiği sürece etkileşmeli çift kutup momentleri oluşacaktır. Ağır iyonlar elektromagnetik alanı kızıl ötesi bölgeye kadar izleyebildiklerinden görünür bölgede kutuplanmaya çok az katkıda bulunurlar. Diğer taraftan elektronlar bu bölgede de yanıt verebildiklerinden elektronik kutuplanmayı oluştururlar. Sürekli yön değiştiren bu çift-kutuplar uyarıldıkları frekansın aynısıyla ışırlar. Bu yüklerin varlığı ve elektromagnetik alan ile etkileşimi herhangi bir enerji kaybına neden olmaz, yalnızca geçişini geciktirir. Bu malzeme, elektromagnetik dalganın hızını azaltarak kendi içindeki dalganın hızının boşluktakine oranı biçiminde bilinen kırılma indisine sahip olur. Yani optiksel kırılma indisinin elektronik kutuplanmadan türediği görülür. Kutuplanmanın artışı daha fazla geciktirici davranışa sebep olacağından bu da kırılma indisinin büyümesi anlamı taşır. Bu durum magnetik olmayan malzemeler için elektromagnetik teoremin bir sonucudur. Kutuplanmayan yükler içeren bir ortamda ise dielektrik sabitinin (ϵ) değeri 1' dir, dolayısıyla gecikme olmayacağı için de $n = 1$ olacaktır.

3.10.3.b. İyonik kutuplanma

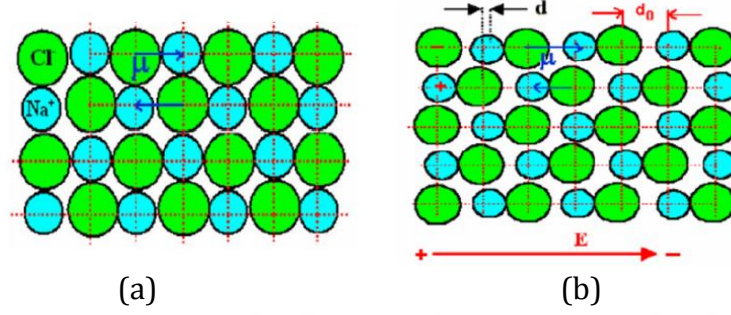
Elektronik ve iyonik kutuplanmanın ortak yönü yüklerin alan yönünde birbirine göre konum değiştirmesidir. Bundan dolayı bu iki kutuplanmaya etkileşimli kutuplanma denmektedir. İyonik kutuplanma, dış elektrik alana yerleştirilen iyonik bağlı bir malzemenin iyonları arasındaki bağların deforme olması ile oluşur. Birbirine yakın olan pozitif ve negatif iyonlar elektrik alanının uygulanmasıyla zıt yönlerde hareket edeceklerinden Şekil 3.30' da görüldüğü gibi aralarındaki bağlar gerilir.



Şekil 3.30. İyonik kutuplanma (Ataseven, 2011)

Molekülleri farklı tip atomlar oluşturduğundan iyonik kutuplanmada, elektron bulutları güçlü bağları olan atomlara doğru yönelecektir. Bu atomlar da elektronları simetrik olarak paylaşmayacaktır. Atomlar böylece zıt kutuplu yükler kazanacaktır. Net yüklere etki eden dış elektrik alan, atomların kendi aralarındaki denge konumlarını değiştirir. Yüklü atomların veya atom gruplarının birbirine göre bu yer değiştirmesiyle ikinci tip etkileşmeli çift-kutup momenti meydana gelecektir. Diğer bir deyişle bu durum dielektriğin atomik kutuplanmasını temsil etmektedir. Bir elektrik alanında pozitif ve negatif yüklü atomlar kendi normal konumlarından küçük miktarda yer değiştirirler. Bu yer değiştirmeler malzemenin boyutunu değiştirebilir. Elektronik kutuplanmaya göre uzun olmakla birlikte iyonik kutuplanma için oldukça kısa bir süre yeterlidir (10^{-13} - 10^{-12} sn). Bu kutuplanmada Maxwell ilişkisi geçerli değildir. Bağlı dielektrik sabiti her zaman optik kırılma indisinin karesinden büyük olacaktır.

İyonik bir kristal olan NaCl yapısında her bir Na^+ ve Cl^- iyon çiftleri doğal birer dipol oluşturur ((Şekil 3.31 (a)). Bir dış elektrik alan uygulanmadığı durumda toplam polarizasyon sıfırdır. Nedeni, oluşan dipol momentler eşit büyüklükte ancak zıt yönlüdür. Dipollerin dönme durumları yoktur.

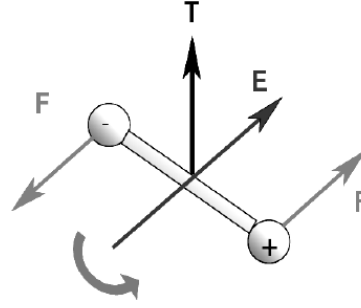


Şekil 3.31. NaCl kristalinde kutuplanma gösterimi, (a) dış elektrik alan uygulanmadığında (b) dış elektrik alan uygulandığında (Ataseven, 2011)

Bir dış elektrik alan uygulandığında durum Şekil 3.31.b' deki gibi olur. İyonlar ters yönlü olmak üzere elektriksel kuvvet altında kalırlar. Na^+ iyonları çok az sağa, Cl^- iyonları da çok az sola hareket eder. Bu durumda net bir dipol moment oluşur. Artık polarizasyon sıfırdan farklı olacaktır.

3.10.3.c. Yönelme kutuplanması

Bu kutuplanma, dış elektrik alan olmadan da elektrik çift kutup momentleri içeren polar dielektriklerde oluşur. Bazı dielektriklerde kuadrupol (dört kutup), oktipol (sekiz kutuplu) vb. çok kutuplular bulunabilir, ancak bunların kutuplanmaya katkısı oldukça azdır. Dış elektrik alan böyle çift-kutuplulara bir tork uygulayarak kendisiyle aynı yönelime zorlayacaktır. Sonuçta Şekil 3.32' de de görüldüğü gibi yönelme kutuplanması ortaya çıkacaktır.



Şekil 3.32. Yönelme kutuplanması (Ataseven, 2011)

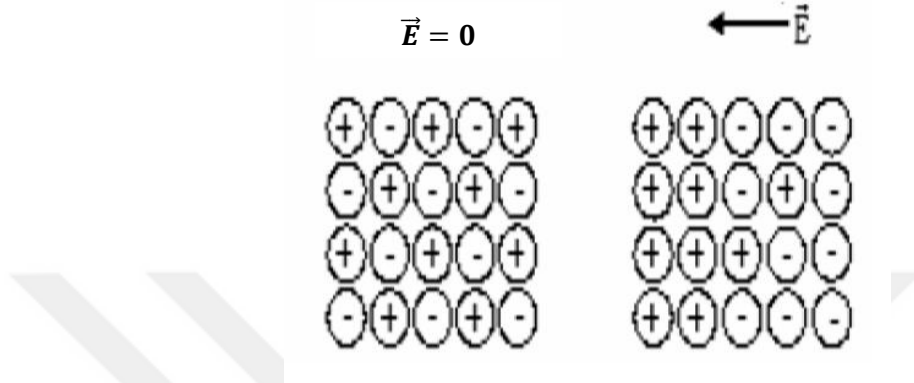
Burada sıcaklık etkilerinin de göz önünde bulundurulması gerekir. Bu kutuplanmada çift-kutup momentli moleküllerin alan uygulanmadan önceki durumuna yeniden dönmesi için molekül boyutlarıyla ortamın viskozunun doğru orantılı olacağı bir zaman dilimine ihtiyaç vardır. Yönelme kutuplanması (10^{-9} - 10^{-3} sn) zaman aralığında, radyo frekans bölgesinde meydana gelir. Bu tür kutuplanma sabit bir dipol momente sahip moleküllerin elektrik alan doğrultusunda yönelmeleri ile gerçekleştiği için 'dipolar kutuplanma' olarak da bilinmektedir. İlk defa Debye tarafından incelenmiştir.

Buraya kadar bahsedilen üç farklı tip kutuplanma, dielektrik içinde yerel olarak bağlı yüklerle oluşmaktadır. İyonik ve elektronik kutuplanmanın ortak yönü yüklerin dönmeden birbirinden uzaklaşmasıdır. Yönelme kutuplanmasında kalıcı çift-kutuplar dış elektrik alan etkisiyle dönmeye zorlanırlar ve alanın hızlı değişimlerinde etkili değildirler. Düşük frekanslarda her üç kutuplanma da meydana gelir. Frekans arttıkça önce kalıcı sonra iyonik ve en son elektronik çift-kutuplar ki; son ikisi etkileşmeli çift-kutup olup dış alanın değişimini izleyemez duruma gelirler. Böylece statik dielektrik sabiti (ϵ_r) 1 değerine ulaşır (Tareev, 1979).

3.10.3.d. Ara yüzey-uzay yük kutuplanması

Elektronik, iyonik ve çift-kutup yönelme kutuplanmalarının ortak yönü, malzemenin sınır yüklerinin yer değiştirmesi ve yönelme etkilerinin ortaya çıkmasıdır. Uzay yükü ya da ara yüzey kutuplanması diğerlerinden farklı olarak hareketli yüklerden oluşur. Diğer kutuplanma türlerinde atom ve moleküller

kendilerini çevrelerinin kutuplanması ile değişikliğe uğrayan, temelde uygulanan dış alanı da içeren bir yerel alan etkisi altında bulurlar. Ara yüzey kutuplanmasında ise malzemedeki uzay yüklerinin ya da dielektriğin arayüzeylerindeki yüzey yüklerinin birikiminde büyük ölçüde elektrik alan değişiklikleri etkili olmaktadır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Ara yüzey yük kutuplanması (Ataseven, 2011)

Polikristal malzemelerin birleşme yüzeylerinde serbest yükler birikebilir. Bu da ara yüzey kutuplanmasını meydana getirir. Biriken yüklerin elektrotlardaki görüntü yüklerini etkilemesi diğer kutuplanmalara da olumlu etki sağlar. Ara yüzey kutuplanması üzerine temel düşünce kristaller arası ayırıcı ara yüzeylerle bağlantılıdır. Bu ara yüzeyler serbest yüklerin bir kristalden diğerine hareketini engelleyici, kristalleri birbirinden izole edici bir rol üstlenir. Bu engeller, herhangi bir hava katmanı veya yüzeyin bir yalıtkan ile kaplanmasıyla oluşabilir. Bu konu ile ilgili çalışanlardan bir kısmı ara yüzey kutuplanmasının nedeninin, tek bir kristaldeki kusurlar (safsızlıklar, çatlaklar) üzerinde boşluk yüklerinin birikmesi olduğunu savunmuşlardır (Tareev, 1979; Von Hippel, 1959; Fröhlich, 1958). Ara yüzey yük kutuplanması için ‘malzemenin içerisine herhangi bir biçimde yerleşmiş uzay yüklerinin elektrotlar üzerindeki görüntü yüklerini etkilemesinin bir sonucudur’ denilebilir. Bu kutuplanma mekanizması, düşük ve orta düzey frekanslarda dielektriklerin karakteristik davranışları üzerinde önemli rol oynamaktadır (Popescu ve Bunget, 1984).

3.10.4. Dipol durulma kavramı

Bir numune elektrik alan içerisinde konulduğunda numune için elektrik yerdeğiştirme (D) ve elektrik alan (E) zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir. Elektrik yerdeğiştirme vektörünün (D) zamana bağlılığı (dipol-durulma olayı) daimi dipollere sahip numunelerde görülür. Bu durum, hiç dipolü olmayan numunelerden farklıdır. Bir kristale $t=0$ anında statik bir elektrik alan belli bir süre uygulandığında kristaldeki dipollerin hareketi iki şekilde olur. Dipoller ya elektrik alan yönünde düzenlenirler, ya da son konfigürasyonlarını korurlar. İlk durum statik durum olarak bilinir. Diğer ise elektrik alan ile kutuplanma vektörünün aynı fazda olmamalarından kaynaklanır.

Elektrostatikte E ile D arasındaki ilişki, homojen izotropik ve lineer dielektrikler için;

$$D = \epsilon E \quad (3.82)$$

ifadesi ile verilir. Burada ϵ zamandan bağımsız gerçek bir sabittir. Numune, sabit bir elektrik alan etkisinde kaldığında elektrik alan ve dolayısıyla elektrik yerdeğiştirme niceliğinin zamanla değişimi görülmez. Bu durum statik durum koşuludur. Bu durumda,

$$D = \epsilon_s E \quad (3.83)$$

olur. Burada ϵ_s statik dielektrik geçirgenlik sabitidir.

Eğer dielektrik numuneye Δt süresince ΔE arttırmalarla elektrik alan uygulanırsa D' de ΔD kadar bir artış meydana gelir. Bu artış;

$$\Delta D = \epsilon_\infty \Delta E. \quad (3.84)$$

ile verilir. Burada ϵ_∞ numunedeki daimi dipoller hareket etmeden önce ΔD ve $\Delta E'$ deki ani değişime karşılık gelen geçirgenlik değerini ifade eder.

Dielektrik numunedeki dipol yönelimi ise açısal frekansı ω olan periyodik bir elektrik alan uygulandığında meydana gelir. Periyodik elektrik alan;

$$E = E_1 e^{i\omega t} \quad (3.85)$$

olur. Elektrik yerdeğiştirme vektörü D , elektrik alana uymaya çalışır. Bu durum aralarındaki muhtemel faz kayması ile ifade edilir. Sonuçta, dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı ve farklı fazda olmak üzere iki bileşeni bulunur. Bu bileşenler aşağıda verilen kompleks gösterimle ifade edilir (Wert ve Thomson, 1970).

$$D = \varepsilon^* E = (\varepsilon' - i\varepsilon'')E \quad (3.86)$$

Burada, gerçek bileşen ε' ile sanal bileşen de ε'' ile ifade edilmektedir. Bu durumda kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti;

$$\varepsilon^* = \left[\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \right] + i \left[\frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \right] \quad (3.87)$$

ile ifade edilir (Wert ve Thomson, 1970). Burada τ zaman sabiti olup dielektrik durulma zamanı olarak bilinir. Numuneye özgü bir nicelik olan τ sıcaklığın bir fonksiyonudur; ω ise sıcaklıktan bağımsızdır.

İlk terim gerçek terimdir. E ile çarpıldığında E ile aynı fazda olan D bileşeni elde edilir. İkinci terim sanal terimdir. E ile çarpıldığında, D' nin E ile aynı fazda olmayan ya da aralarındaki faz farkı 90° olan bileşenini verir.

Kompleks notasyonda belirtilmiş olan dielektrik geçirgenlik sabitinin aynı faz ile farklı fazlı yani gerçek ve sanal bileşenleri;

$$\varepsilon' = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3.88)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2 \tau^2} \omega \tau \quad (3.89)$$

olur. Burada Eşitlik (3.88) ve (3.89) yeniden düzenlenirse;

$$\frac{\varepsilon' - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty} = \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (3.90a)$$

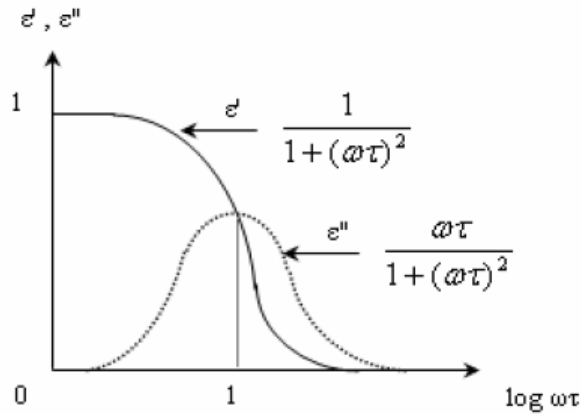
$$\frac{\varepsilon''}{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty} = \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (3.90b)$$

elde edilir (Chelkowski, 1980; Kaya vd., 2016). Eşitlik (3.90a)'nın sağ tarafı frekans sıfırla sonsuz arasında değiştiğinde sıfır değerine yaklaşır. Bu terim aşağıda Şekil 3.34' de dolu çizgi ile gösterilmiş olan $\log \omega\tau$ 'nin bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Çok düşük frekanslarda ($\omega \ll 1/\tau$) dielektrik sabitinin gerçekteki bileşeni statik dielektrik sabitine yaklaşır. Yüksek frekanslarda ($\omega \gg 1/\tau$) ise gerçekteki bileşen ε_∞ değerine yaklaşır. Yüksek ve alçak frekans arasında kalan bölgede ise iki faz bölgesi arasında düzgün geçişler olur. Dielektrik sabitinin sanal bileşeni ile ilgili eğri yine Şekil 3.34' de kesikli çizgi ile belirtilmektedir. Eğride bu terimin $\omega = 1/\tau$ olduğu noktada belirli bir maksimum verdiği görülmektedir.

Enerji kayıp değeri de kayıp açısı δ ile tanımlanır. Bu değer;

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty} \omega\tau \quad (3.91)$$

ile ifade edilir (Wert ve Thomson, 1970; Chelkowski, 1980).



Şekil 3.34. Dielektrik sabitinin gerçekteki (ε') ve sanal (ε'') bileşenlerinin frekansa bağlı değişimi (Çetinkaya, 2015)

Dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp ölçüm tekniği

Dielektrik malzemelerin dışarıdan uygulanan elektrik alana duyarlı oluşu onların elektriksel özelliklerinin araştırılmasında önemlidir. Bu araştırma için bir dielektrik madde, bir elektriksel devre ile özdeşleştirilir. Plakaları arası bir dielektrik madde ile doldurulmuş paralel plakalı kondansatör yapısı, admittans ölçüm tekniği ile karakterize edilebilir. Buna göre admittans (Y) ifadesi;

$$Y = G + i\omega C \quad (3.92)$$

olarak verilir. G iletkenlik, ω sürücü geriliminin açısal frekansı, C ise toplam kapasitedir. Bu ifadede C yerine $\epsilon^* C_0$ yazıldığında,

$$Y = G + i\omega(\epsilon^* C_0) \quad (3.93)$$

şekline dönüşür. C_0 kondansatörün dielektrik madde yokken sahip olduğu kapasite, ϵ^* dielektrik maddenin boşluğa göre sahip olduğu bağıl dielektrik geçirgenlik sabitidir. Bağıl dielektrik sabiti,

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (3.94)$$

olarak ifade edilir. Bu ifadeye göre admittans tekrar düzenlenecek olursa,

$$Y = G + i\omega C_0(\epsilon' - i\epsilon'') = (G + \omega\epsilon'' C_0) + i\omega C_0\epsilon' \quad (3.95)$$

olur. Buna göre admittansın gerçel ve sanal bileşenleri elde edilmiş olur. Empedans, admittansın tersine eşit olduğundan ($Z = 1/Y$),

$$Z = \frac{1}{i\omega C + G} = \frac{1}{i\omega C_0\epsilon^* + G} \quad (3.96)$$

ile ifade edilir. Eşitlik (3.94), Eşitlik (3.96)' de yerine yazılırsa dielektrik sabiti ve dielektrik kayıp, sırasıyla;

$$\epsilon' = \frac{C}{C_0} \quad (3.97)$$

$$\epsilon'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{1}{\omega R C_0} \quad (3.98)$$

olarak elde edilir (Symth, 1955).

Dielektrik materyalin elektriksel davranışı paralel RC devresi ile açıklanabilir. İdeal bir kondansatör *ac* gerilim altındayken üzerinden geçen akım, üzerindeki potansiyelden 90° ileridedir. Plakaları arasına bir dielektrik malzeme konulduğunda ise dielektrik içindeki kutuplanmadan kaynaklanan kayıptan dolayı bu faz farkı 90° daha küçük değerlere iner.

Bir kondansatöre *ac* gerilim $\{V(t) = V_0 \cos \omega t\}$ uygulandığında, kondansatördeki toplam akım,

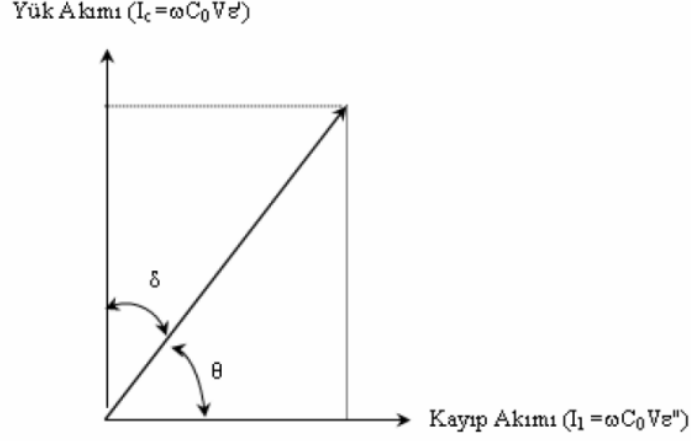
$$I = I_l + I_c = (G + i\omega C)V \quad (3.99)$$

olarak ifade edilir. Burada I_l ; *ac* gerilimi ile aynı fazda olan kayıp akım, I_c ise *ac* gerilimi ile farklı fazda olan yük akımını temsil eder. G , dielektrik maddenin iletkenliğidir (Von Hippel, 1954). Bu akımlar sırasıyla şöyle ifade edilebilir;

$$I_l = GV = \omega C_0 V \epsilon'' \quad (3.100)$$

$$I_c = \omega CV = \omega C_0 V \epsilon' \quad (3.101)$$

Dielektrik madde içeren bir kondansatörden geçen akım, bileşenleri ile birlikte Şekil 3.35' de gösterilmiştir. Burada δ ve θ sırasıyla kayıp ve güç faktörü açılarıdır.



Şekil 3.35. Dielektrik içeren bir kondansatörde yük akımı (I_c) ile kayıp akım (I_l) arasındaki ilişki (Çetinkaya, 2015)

δ terimi, numune üzerindeki *ac* gerilim etkisi nedeniyle dielektrik maddenin davranışındaki periyodik elektrik alan ile onunla aynı fazda olmayan elektrik yerdeğiştirme arasındaki faz kayması olarak tanımlanır. $\tan\delta$ ise, sığasal olarak numunede depolanan enerjinin bir periyot kayma miktarı biçiminde kayıp tanjant (kayıp açısı) olarak tanımlanır. Dielektrik malzemenin iletkenliği arttıkça kayıp akımı artacağından kayıp açısı büyüyecektir. Kayıp açısı, ölçüm sırasında kayıp akımın yük akımına oranı olarak elde edilir. Bu oran Eşitlik (3.102)'de verilmiştir (Von Hippel, 1954; Daniel, 1967).

$$\tan\delta = \left| \frac{I_l}{I_c} \right| = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{1}{\omega RC} \quad (3.102)$$

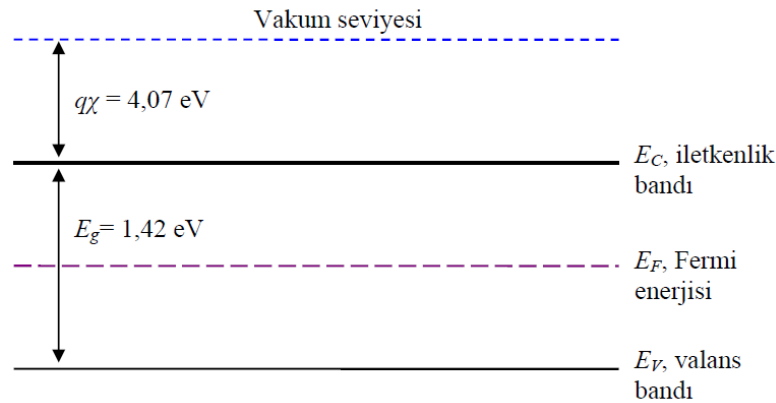
Plakaları arasında dielektrik malzeme bulunan kondansatör yalıtkanlığını koruyabildiği maksimum gerilim altındayken ısınır. Eğer *a.c.* gerilim uygulanırsa ısınma miktarı önemli derecede artış gösterir. Açığa çıkan ısı, gerilimin frekansı ile artar. Bu duruma sebep dış alanın değişen yönüne göre yönelecek olan moleküllerin birbirine sürtünmeleridir. Bu sürtünmelere karşı yapılan iş ısıya dönüşür. Komşu moleküllerle yapılan sürtünmelerden dolayı molekülün alan yönünü takip edişi gecikir. Burada dielektrikte ısıya dönüşen enerji 'dielektrik kayıp' olarak tanımlanır. Sıcaklık arttığında dielektrik kayıplar da artar (Oral, 1983).

4. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

Bu bölüm, üç farklı Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyotların malzeme bilgisi, numune hazırlama ve diyotların yapımı ile ilgili bilgiler içermektedir. Çalışılan numunelerin hazırlanması ve diyotların yapımı Bilkent Üniversitesi UNAM Temiz Oda' da, elektriksel karakterizasyon ölçümleri ise Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezindeki İleri Yarıiletken Laboratuvarı' nda (STARLAB) gerçekleştirilmiştir.

4.1.GaAs Kristalinin Temel Özellikleri

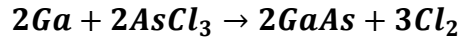
İlk kez 1920' li yıllarda Goldschmidt tarafından üretilen gallium arsenide (GaAs) periyodik tablonun III. grubundaki galyum (Ga) ve V. grubundaki arsenik (As) elementlerinden meydana gelen III-V bileşik yarıiletkenidir. Şekil 4.1' de GaAs için enerji-bant diyagramı gösterilmiştir. Yasak enerji aralığı (E_g); sıcaklığa, yarıiletken malzemenin cinsine, saflığına ve katkılama yapısına bağlıdır.



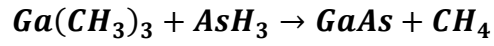
Şekil 4.1. GaAs için enerji-bant diyagramı

GaAs, çeşitli tekniklerle kristal yapıda büyütülebilir. Bunlardan ilki Bridgman-Stockbarger tekniği olup burada GaAs, Ga ve As buharı bir ucu soğutucuya bağlı bir tohum kristal üzerinde reaksiyona girecek şekilde yatay bir fırın kullanılarak büyütülmüştür. Diğer bir teknik olan LEC (liquid encapsulated Czochralski) tekniğinde GaAs, As basıncı altında bir pota içindeki Ga eriyiğinin tohum kristal üzerine büyütülmesiyle elde edilmiştir. VPE (Vapour phase epitaxy) tekniğinde

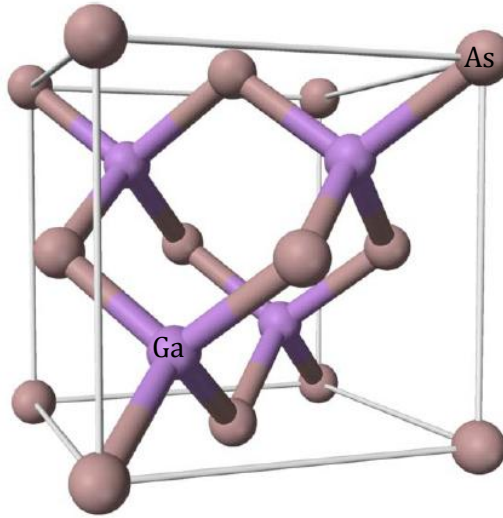
ise gaz fazındaki galyum metali ile arsenik trikloridin reaksiyonu ile aşağıda görüldüğü gibi GaAs filmler elde edilmiştir.



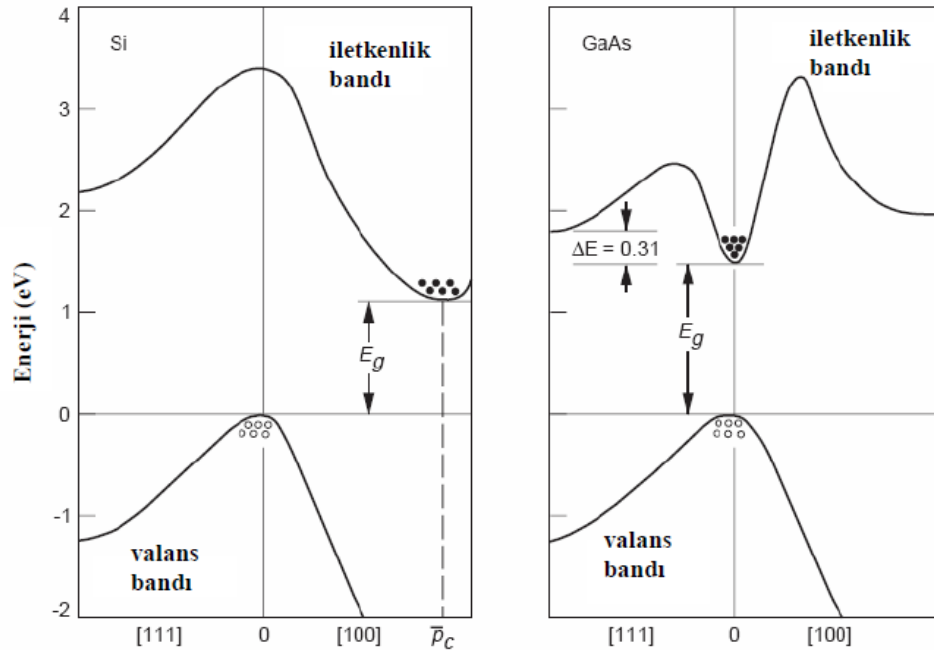
MOCVD (metal-organic chemical vapour deposition) tekniği kullanılarak elde edilen GaAs kristali ise, trimetilgalyum ile arsinin aşağıda yazılı reaksiyonu sonucu elde edilmiştir.



Şekil 4.2' de GaAs kristal yapısı verilmiştir. Burada arsenik ve galyum atomlarının kristal örgüdeki yerleşimleri açıkça görülmektedir.



Şekil 4.2. GaAs kristal yapısı

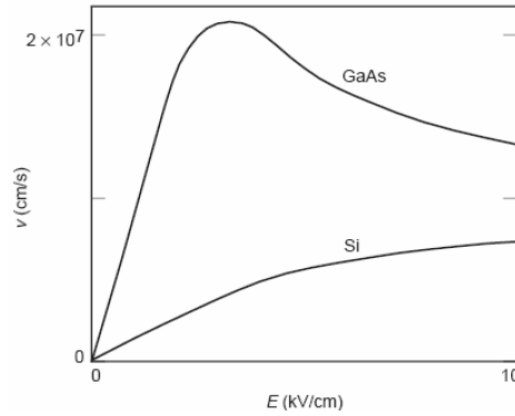


Şekil 4.3. Si ve GaAs için enerji-bant yapıları (boş daireler valans bandındaki holleri, dolu daireler ise iletkenlik bandındaki elektronları temsil eder.)

Şekil 4.3' de GaAs için iletkenlik bandının tabanı ile valans bandının tepesinin aynı k dalga vektörü değerinde olduğu, Si için ise olmadığı açıkça görülmektedir. Bu farklılık GaAs için valans bandından iletkenlik bandına geçen bir elektron için momentum değişimi olmayacağını göstermektedir. Bu özelliğinden dolayı GaAs doğrudan bant aralıklı yarıiletken olarak adlandırılır ve optoelektronik devrelerde tercih edilir. Ancak aynı şekilde Si için valans bandının tepesi ile iletkenlik bandının tabanının aynı k değerinde olmayışı, valans bandından iletkenlik bandına doğru olan elektron geçişi esnasında momentum değişimi anlamına gelir. Si bu özelliğinden dolayı doğrudan olmayan bant aralıklı yarıiletken sınıfına girer ve optoelektronik uygulamalarda kullanılamaz.

Silisyum doğada bol miktarda bulunan, kolay işlenebilme özelliğine sahip, maliyeti düşük bir yarıiletken malzemedir. Bu özelliklerinden dolayı yarıiletken teknolojisinin son kırk yılından fazlasında var olmuştur. GaAs ise bu zaman yolculuğunda askeri ve ticari alanlar dahil olmak üzere Si kadar ilgi görmemiştir. Sonraları mikrodalga frekanslarında çalışan yarıiletken devre elemanları için taleplerin artması, galyum arsenaytı yarıiletken teknoloji pazarında silisyum ile yarışır hale getirmiştir. Düşük ve yüksek frekans devre

elemanlarının yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. GaAs' ın silisyuma karşı avantajlarından ilki yüksek elektron mobilitesine sahip oluşudur. Bu özelliği GaAs' ın mikrodalga frekanslarda çalışmasını sağlayan en önemli özelliğidir. Çünkü mobilité, taşıyıcı hareketliliği ile ilgili bir parametre olduğundan yük taşıyıcılarının (elektron veya hol) elektrik alandan ne kadar etkilendiklerini göstermesi açısından son derece önemlidir. Dolayısıyla taşıyıcı hızının elektrik alana karşı grafiği taşıyıcı mobilitesi hakkında bilgi verir.



Şekil 4.4. Elektrik alanın fonksiyonu olarak Si ve GaAs için taşıyıcı hızlarının değişimi

Şekil 4.4. uygulanan elektrik alanın fonksiyonu olarak Si ve GaAs' ın taşıyıcı hızlarının değişimini göstermektedir. Görüldüğü gibi GaAs için maksimum nokta dikkate alındığında elektron mobilitesinin silisyumunkinin yaklaşık altı katından fazla olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalar GaAs kullanılarak yapılan dijital devre elemanlarının silisyumla yapılanlara göre iki ila beş kat daha hızlı çalıştığını ve daha az güç kaybına sebep olduğunu göstermektedir. GaAs' ın bu avantajlarının yanında yarıiletken bir taban malzeme olarak üretilebilme özelliği onu elektronik ve optoelektronik uygulamalarda popüler bir yere taşımıştır. Yarıyalıtkan özelliği, devre elemanları arasında yalıtkan bir görev üstleneceğinden dolayı düşük elektronik gürültü ve eksiksiz tümleşik devre üretimi de sağlar. GaAs ayrıca silisyuma göre daha büyük bir yasak enerji aralığına sahip olduğu için öz direnci daha büyüktür. Bu özelliğine kısa azınlık taşıyıcı hayat süresine sahip olması da eklendiğinde GaAs' ın radyasyona karşı dayanıklı bir malzeme olduğu da söylenebilir. Çizelge 4.1' de GaAs' ın oda

sıcaklığına (300K) bazı temel özellikleri sıralanmıştır (Sze, 1981; Sze ve Kwok, 2007; Neaman, 1997).

Çizelge 4.1. GaAs' ın bazı temel özellikleri

Özellik	GaAs
Atom (cm ³)	4.42×10 ²²
Atom ağırlığı (kg/mol)	144.63
Kristal yapısı	Zincblende
Yoğunluğu (g/cm ³)	5.32
Dielektrik sabiti	13.1
İletkenlik bandındaki durum yoğunluğu N _c (cm ⁻³)	4.7×10 ¹⁷
Valans bandındaki durum yoğunluğu N _v (cm ⁻³)	7.0×10 ¹⁸
Asal (saf) taşıyıcı yoğunluğu n _i (cm ⁻³)	1.8×10 ⁶
Örgü sabiti (Å)	5.65325
Elektronların etkin kütlesi (m^*/m_0)	0.067
Boşlukların etkin kütlesi (m^*/m_0)	$m_{lh}^* = 0.082$ $m_{hh}^* = 0.45$
Elektron ilgisi (yakınlığı) χ (eV)	4.07
Yasak enerji aralığı (eV)	1.42
Enerji aralığı tipi	Direkt
Mobilitesi (hareketliliği) μ (cm ² /Vs)	
Elektronlar μ_n	8500
Boşluklar μ_p	400
Erime Sıcaklığı (°C)	1238
Termal genleşme katsayısı (10 ⁻⁶ /°C)	6
Termal iletkenlik (W/cm°C)	0.46
Erime noktasındaki buhar basıncı (Torr)	740
Maksimum işlem sıcaklığı (°C)	400
Durum yoğunluğunun etkin kütlesi	
Elektronlar (m_n^*/m_0)	0.067
Boşluklar (m_p^*/m_0)	0.48
Azınlık taşıyıcı yaşam süresi (s)	~10 ⁻⁸
Saf öz direnci (Ω .cm)	10 ⁸

4.2. Arayüzey Yalıtkan Tabaka Al₂O₃

Al₂O₃ (safir/sapphire) M.Ö. 800' lü yıllardan beri kullanılan denge taşı/gökyakut olarak da bilinen değerli bir taştır. Mükemmel renk, dayanıklılık ve parlaklık içeren göz kamaştırıcı görüntüsüyle yüzyıllardır insanları kendine hayran bırakmıştır. Safir uzun yıllar boyunca sadece mavi renkte kabul edilmesine karşın gerçekte birçok farklı renkte oluşabilmektedir. Safir ile yakut aynı mineralden elde edilmekte ve birbirine çok yakın özellikler göstermektedir. Yakutu ayıran tek fark kırmızı tonlardaki renkleri olup diğer renkler safir olarak adlandırılmaktadır. Çok sayıda çeşide sahip safir, en çok mavi renkte tercih edilse de çok nadir bulunan turuncu-pembe tonlarındakiler de eşsiz niteliktedir. Antik çağlarda mavi lazurit taşı ile karıştırılan safir o zamandan şimdiye çok çeşitli mücevher ve değerli süs eşyalarında kullanılmıştır. Eski Mısır' da tanrı Horus' un gözü olduğuna inanılan bu kıymetli taşı Perslerin Grek tehdidine karşı; Ortaçağ Avrupası' nda, papazların ise kötü güçleri yok ettiğine inandıkları için üzerlerinde taşımıştır. Osmanlı İmparatorluğu'nda birçok takı, mücevher ve aksesuarın gözde taşları arasında yer alan safirin izlerini ise Topkapı Sarayı'ndaki mücevherlerde görmek mümkündür.

İlk sentetik safirin üretimi, 1902 yılında Fransız kimyager Auguste Victor Louis Verneuil tarafından başlatılmıştır. Amerika Birleşik Devletleri'nde ilk safir yatakları 1865 yılında Missouri nehri yataklarında bulunmuştur. 'Safir' kelimesi Yunanca 'sappheiros' yani 'mavi' anlamındaki kelimeden türetilmiştir.

Safir alüminyum oksitin (Al₂O₃) kristal formudur. Sertlik değeri 9 mohs ile ifade edilmektedir. Yakut ile aynı sertlik değerindedir. Elmaştan sonra yakut ile birlikte en sert doğal taştır. Kristal formu köşeli skalenohedraldir. Doğada nadir bulunan değerli taşlardan olup korendon mineralinde bulunmaktadır. Korendonun kırmızı renkli olanlarına yakut denir. Safirin tipik ve en çok tercih edilen rengi mavidir ancak mor, sarı, turuncu, pembemsi, siyah, gri ve yeşil renkli safirler de bulunabilmektedir. Kırmızı renkte safir bulunmaz. Kırmızı korendon minerali yakuttur. Renklerdeki farklılık mineraldeki krom, demir, vanadyum veya titanyum içeriğine bağlıdır. Mor safirler içeriğindeki eser miktar

vanadyum oranına göre çeşitli tonlarda oluşur. Yüzde 0.01 oranında titanyum içeren korendon minerali ise renksiz safiri verir. Eser miktarda demir içeren safirler ise sarı veya yeşil renk verirler. Korendon doğada bol bulunur ancak değerli taş içerenlerine nadir rastlanır. Safir içerenleri magmatik kayaç, pegmatit ve çeşitli bazik oluşumların başlıca bileşenlerindendir. Ticari olarak genellikle alüvyon çakıllar ve diğer ikincil yataklardan elde edilir.

Safirin doğadaki formu ağırlıklı olarak takı ve mücevherlerde kullanılmasıdır. Laboratuvar ortamında endüstriyel, dekoratif ve ticari amaçlı sentetik safir de üretilebilmektedir. Kızılötesi optik bileşenler, saat kristalleri ve camları ile elektronik endüstrisindeki küçük elektronik plakalarda safir kullanılabilmektedir. Sentetik safir, zirkonya ve alüminyum oksinitrit ile birlikte zırhlı araçların kırılmaz camları ve çeşitli askeri araçların zırh takımlarında kullanılmaktadır. Ksenon farların camları da safir içermektedir. Kırılmaz ve çizilmez özelliği sebebiyle son yıllarda bazı cep telefonu ekranları, kamera mercekleri ve tuşlarında da safir kullanılmaktadır (Eskier, 2017).

Safirlerin değeri; rengi, saydamlığı, boyutu, kesimi ve kalitesine göre farklılık gösterir. Tayland'ın özerk bölgesi Myanmar-Burma' da çok değerli safir yatakları bulunmaktadır. En değerli mavi olanları Burmai Keşmir ve Sri Lanka' da bulunur. Bu bölgedekiler herhangi bir işleme tabi tutulmadan mükemmel düzeyde renk ve saydamlık verir. Dünyanın dört bir yanından gelen doğal safirlerin kesilerek işlenmesi Tayland'ın Chanthaburi kentinde yapılmaktadır. Bu kent hemen hemen tüm dünyadaki tüm safir ve yakutların ana işleme ve ticaret merkezidir. Safir rezervleri; Doğu Avusturalya, Afganistan, Kamboçya, Kolombiya, Sri Lanka, Avusturalya, Tayland (Burma), Çin, Madagaskar, Hindistan, Kenya, Laos, Malavi, Nepal, Nijerya, Pakistan, Tacikistan, Tanzanya, Vietnam, Doğu Afrika ve Kuzey Amerika gibi ülkelerde bulunur. Türkiye' de ticari anlamda ekonomik safir rezervi ve üretimi bulunmamaktadır (Anonim, 2017).

4.3. Atomik Katman Kaplama Yöntemi(ALD)

ALD yöntemi birbirini izleyen doymuş yüzey reaksiyonlarına dayalı kimyasal gaz fazlı ince film biriktirme metodudur. Diğer fiziksel ve kimyasal buhar biriktirme (PVD ve CVD) tekniklerinden farklı olarak burada reaksiyon ortamı her kaynak buhara maruz kalmadan önce periyodik olarak dış etkenlerden arındırılır. Her bir öncü maruz bırakma adımı, yüzeyi öncünün monomoleküler tabakasıyla doyurur. Böylece bu durum; mükemmel uyum, tek düzelik, basit ve hatasız film kalınlık kontrolü gibi yararlı özellikleri olan bir film büyütme mekanizmasıyla sonuçlanmış olur.

Son yıllarda entegre devre endüstrisinde kullanılan ince film biriktirme tekniklerindeki uyum problemlerinin giderilmesinde ALD yöntemi potansiyel bir çözüm alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Atomik olmayan geleneksel kaplama teknikleri yapabileceklerinin sınırlarına ulaştıklarından yarıiletken teknolojisindeki ince filmlerin kaplanmasıdaki önemini kaybetmektedir. Bu durum yerlerini atomik boyutta kaplama olanağı sağlayan tekniklere bırakmalarına yol açmaktadır.

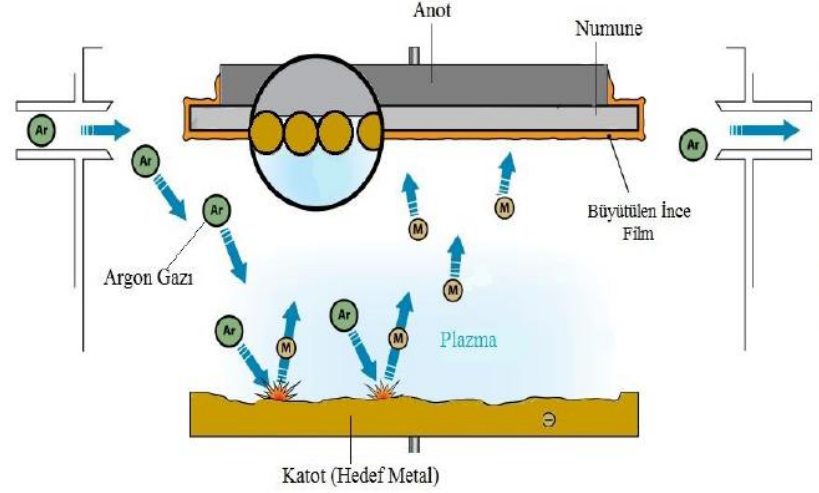
Entegre devre aygıt boyutlarının sürekli küçülmesi yüksek kalitede ve ultra ince filmlerin kaplanmasını zorunlu kılmaktadır. CVD ve PVD teknikleriyle yapılan kaplamada bu ince yüzeylerde sürekli film büyütme oldukça zordur. Bunların yanında ALD yöntemi, gelişmekte olan ultra ince film kaplama teknolojisidir. Bu teknik, atomik ölçekte film kalınlık kontrolü, yüksek uzunluk oranlarında %100 garantili kaplama adımı, kristal yapıda olmayan yüksek yoğunlukta (amorfe) filmler, tane sınırları ve gözeneklerin serbestliği, mükemmel plaka düzgünlüğü ve elverişli elektriksel özelliği gibi birçok önemli özelliğe sahiptir. ALD tekniği farklı malzemelerin avantajlı özelliklerini birleştirerek nano plakalar veya alaşımlı filmler oluşturarak hem yalıtkan hem de metal özelliklere sahip malzemelerin mühendisliğinde kullanılabilir. Ayrıca, düz panel ekranlar, mikro elektro-mekanik sistemler (MEMS), bilgi depolama alanlarındaki uygulamalar gibi ultra ince film gerektiren diğer teknolojiler için de ciddi bir potansiyele sahiptir (Karabulut, 2014). Resim 4.1’de ALD ünitesi görülmektedir.



Resim 4.1. Savannah 100 Atomik katman kaplama ünitesi

4.4. Manyetik Alanda DC Saçtırma Yöntemi

Yarıiletken yüzeyine metal kaplama yöntemlerinin en yaygınlarından biri saçtırma yöntemidir. Bu yöntem, genellikle katot olarak kullanılan bir elektrotun ağır pozitif iyonlarla bombardımanı sonucu elektrot atomlarının bir kısmının sökülüp alttaş üzerinde ince bir tabaka oluşturması esasına dayanır. Saçtırma yöntemi temel olarak üç farklı biçimde yapılabilir; bunlar *d.c.* (doğru akım), RF (radyo frekansı) ve DC-RF saçtırma teknikleridir. Bunlardan her biri manyetik alan yardımıyla daha etkin hale getirilebilir. Manyetik alanda DC saçtırma elektrik alan vasıtasıyla hedef metale yönlendirilen iyonların manyetik alanda selenoidal (sarmal yay) bir hareketle hedef metale çarpması ve ondan kopardığı atomların bir kısmının taban malzeme üzerine büyümesi olayıdır. Bu sistem Şekil 4.5.' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Manyetik alanda DC saçırma sisteminin şeması (Karabulut, 2014)

Bu yöntemde 100 mTorr civarında basınca sahip argon gazı ortamında yaklaşık olarak manyetik alana dik uygulanan elektrik alan vasıtasıyla, Ar plazması (tamamen iyonlaşmış atom bulutu) oluşturulur. Mevcut elektrik alandan dolayı plazmadaki iyonlar ve elektronlar (e^-) birbirine zıt yönde hızlanmaya başlar. Ar atomu bir e^- verdiği için pozitif değerlidir. Hedef metale negatif voltaj uygulandığı için bu Ar^+ iyonları hedefe doğru hızlanmaya başlar. Belirli bir hız ile manyetik alana giren iyonlar, içten dışa doğru olan manyetik alan etkisiyle dairesel bir yörüngede hareket etmeye başlar. Bu hareketi meydana getiren kuvvet;

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

ile ifade edilebilir. Burada q iyonun yükünü, v iyonun hızını, B manyetik alanı ve F de manyetik alanın Ar^+ iyonu üzerinde oluşturduğu ve iyonun hızına dik olan kuvveti temsil eder. Bu kuvvetin etkisiyle dönme hareketi yapan iyonlar elektrik alan etkisiyle de hedef metale doğru bir öteleme hareketi yapar. Böylece Ar^+ iyonları selenoidal bir hareketle hedef metale çarpar. Bu çarpma sonucunda atomlar hedef metalden ayrılırlar. Bu çarpmanın etkisiyle yönteme ismini veren saçılma olayı meydana gelir ve atomlar belirli hızlarla etrafa yayılır. Bu yayılan atomlardan bir kısmı taban malzeme üzerine gelir ve böylelikle taban malzeme üzerinde bir metal film tabaka büyümüş olur. İyi derecede mekanik adhezyona sahip metal filmler çok yüksek vakuma gerek

duyulmadan kolayca oluşturulabildiğinden saçtırma yöntemi metal/yarıiletken kontak üretimi için oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır (Karabulut, 2014). Bu çalışmada kullanılan Manyetik alan DC-RF saçtırma ünitesi Resim 4.2 de gösterilmiştir.



Resim 4.2. Manyetik alan DC-RF Saçtırma Ünitesi

4.5. *n*-GaAs Kristalinin Temizlenmesi ve Numunelerin Hazırlanması

Au/Ti/Al₂O₃/*n*-GaAs Schottky engel diyotlar, (100) yüzey yönelimli, 300 µm kalınlıklı, 0.108 Ω.cm öz dirençli, 2 inç çaplı, 6.8×10¹⁵ cm³ taşıyıcı konsantrasyonuna sahip bir yüzü parlatılmış tek kristal *n*-tipi GaAs altlık malzeme kullanılarak üretildi. Herhangi bir mekanik hasarın olmadığı numuneler 1×1 cm² boyutlarında kesilerek sadece kimyasal çözücü ile temizleme işlemi gerçekleştirildi. Bilindiği gibi ideale yakın bir Schottky diyot elde edebilmek için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. Çünkü iyi temizlenmiş bir yarıiletken çok sayıda yüzey kusurunu ortadan kaldırır. Kristal yüzeyindeki organik veya ağır metal kirlerini temizlemek ve yüzey pürüzlerini ortadan kaldırmak için kimyasal temizleme işlemine azami özen gösterilmiştir. Numunelerin temizlenmesi için sırasıyla şu işlemler uygulanmıştır;

- Asetonda ultrasonik olarak 2 dakika yıkama
- İsoopropanol ile ultrasonik olarak 2 dakika yıkama
- Deiyonize su (18MΩ) ile iyice yıkama
- Azot gazı (N₂) ile kurutma

Kristal yüzeyi üzerinde mat olan yüzeye ohmik, parlak olan yüzeye ise doğrultucu (Schottky) kontağı yapılmıştır. *n*-GaAs altlık malzemesi, yüzey temizliğinden sonra yüksek vakum pompalı kaplama ünitesi yardımıyla yaklaşık 10^{-6} Torr' luk basınç altında yaklaşık 2000Å kalınlıktaki yüksek saflıkta (%99.99) In ile kaplanmıştır. Vakum ortamından alınan numune iyi bir ohmik kontak elde etmek için hızlı termal tavlama (RTA-Rapid Termal Annealing) ünitesinde N_2 ortamında $385^{\circ}C$ ' de 3 dakika tavlannmıştır. Metal buharlaştırmada kullanılan yüksek vakum pompalı kaplama ünitesi ile hızlı termal tavlama ünitesi sırasıyla Resim 4.3 ve Resim 4.4' de gösterilmiştir.



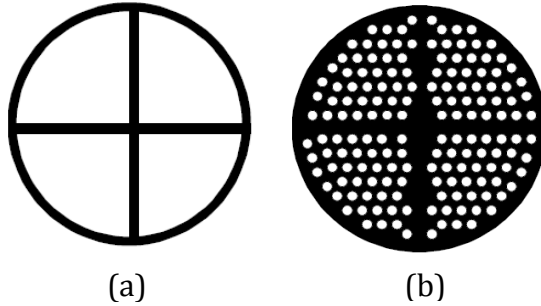
Resim 4.3. Yüksek vakum pompalı kaplama ünitesi



Resim 4.4. Hızlı termal tavlama ünitesi (Rapid Termal Annealing-RTA) (Karabulut, 2014)

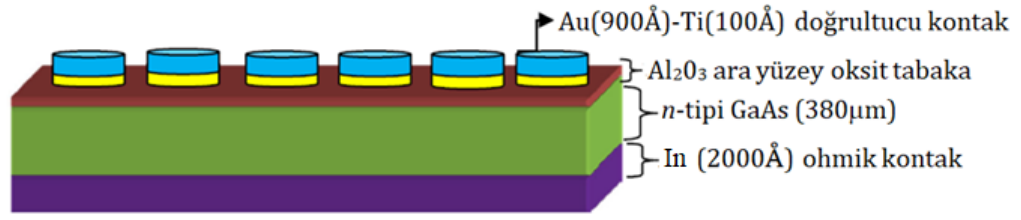
Ohmik kontak fabrikasyonu bittikten sonra tasarlanan MIS tipi SBD diyot için ara katman olarak farklı kalınlıklarda Al_2O_3 yalıtkan malzemesi numunelerin

parlak yüzeyine ALD metodu ile kaplanmıştır. Al_2O_3 ile kaplanmış n -GaAs altlık malzemesi Schottky diyot yapmak için döner tablanın üzerine yerleştirilmiştir.. Doğrultucu ve ohmik kontak yapımında kullanılan maskeler Şekil 4.6. (a) ve (b) de gösterilmiştir. Şekil 4.6 (b)' den de görüldüğü gibi birçok dairesel deliğe sahip bakır maske yardımıyla alttaş üzerinde çok sayıda kontak oluşumu sağlanmıştır Ters görüntü maskesi için döner tabla pozitif fotoresist (AZ5214) kullanılarak 40s süreyle 4000rpm sabit hızla döndürülmüştür. Ardından 50s süreyle 110°C ' de fırınlanmıştır. Uygulanan fotoresistin vizkozitesine bağlı olarak n -GaAs altlık üzerine belli kalınlıkta film kaplanmıştır. Bu işlemin ardından $1\times 1\text{ mm}^2$ lik kare desenli bir foto maske fotoresistinin üzerine konularak 20mj enerjili UV ışığına maruz bırakılmıştır. Daha sonra 2 dakika 120°C ' de fırınlanmış ve ardından maske kullanılmadan 60 mj' lük enerjiye sahip UV ışığına maruz bırakılmıştır. Daha sonra ısınlanan resist deseni MF-701 çözücüsünde 40s banyo ettirilmiş, böylece fazlalık fotoresist uzaklaştırılmıştır.



Şekil 4.6. (a) Ohmik kontak (b) Doğrultucu kontak oluşturmak için kullanılan maskeler

Bu işlemlerden sonra n -GaAs altlık malzeme $18\text{ M}\Omega$ dirence sahip DI su ile durulanmış ve N_2 gazı ile kurulanmıştır. Ardından manyetik alanda DC saçtırma tekniği ile $\text{Au}(90\text{nm})/\text{Ti}(10\text{nm})$ Schottky kontaklar yapılmıştır. Son işlem olarak fotoresist aseton ile uzaklaştırılarak N_2 gazı altında durulanmıştır. Böylece Şekil 4.7.' de şematik olarak görülen MIS tipi Schottky bariyer diyotlar elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In MIS tipi Schottky bariyer diyodun şematik gösterimi

4.6.Yapılan Çalışmalar Esnasında Kullanılan Cihazlar

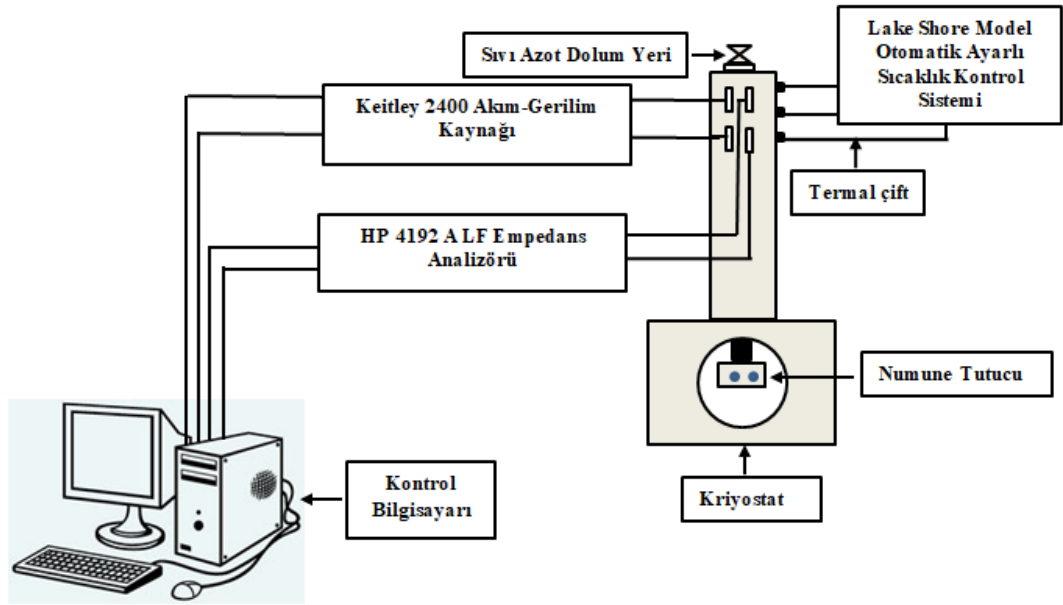
1. Bilkent Üniversitesi bünyesinde hizmet veren UNAM (Uluslararası Nanoteknoloji Araştırma Merkezi) temiz odada bulunan ALD (Savannah 100) sistemi
2. ($\pm 10\text{pA}$, $\pm 1\text{ A}$) aralığında ölçüm yapabilen Keitley 2400 akım-gerilim (I-V) kaynağı (SourceMeter)
3. (5Hz-13Hz) aralığında kapasite-frekans (C-f), kondüktans-frekans (G-f) ve kapasite-voltaj (C-V), kondüktans-voltaj (G-V) ölçümü yapabilen Hewlett Packard (HP) 4192A LF empedans analizörü (Impedance Analyzer)
4. Janis VPF475 sıvı azotlu kriyostat sistemi (Liquid Nitrogen Cryostat) ve Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi (Autotuning Temperature Controller)
5. Yüksek vakum pompalı kaplama ünitesi
6. Manyetik alan DC-RF saçtırma ünitesi
7. Hızlı termal tavlama ünitesi (Rapid Termal Annealing-RTA)

4.7. Deneysel Ölçüm Sistemi

Hem pozitif hem de negatif voltajda I-V ölçümleri için Keitley 2400 akım-gerilim (I-V) kaynağı kullanılmıştır. Frekansa bağlı C-V ve G/ω -V ölçümleri için ise (5Hz-13 MHz) aralığında ölçüm yapabilen HP 4192A LF empedans analizörü kullanılmıştır. Ölçümler, (1kHz-1MHz) frekans aralığında ve oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Sıcaklığa bağlı C-V ve G/ω -V ölçümleri ise Janis VPF475

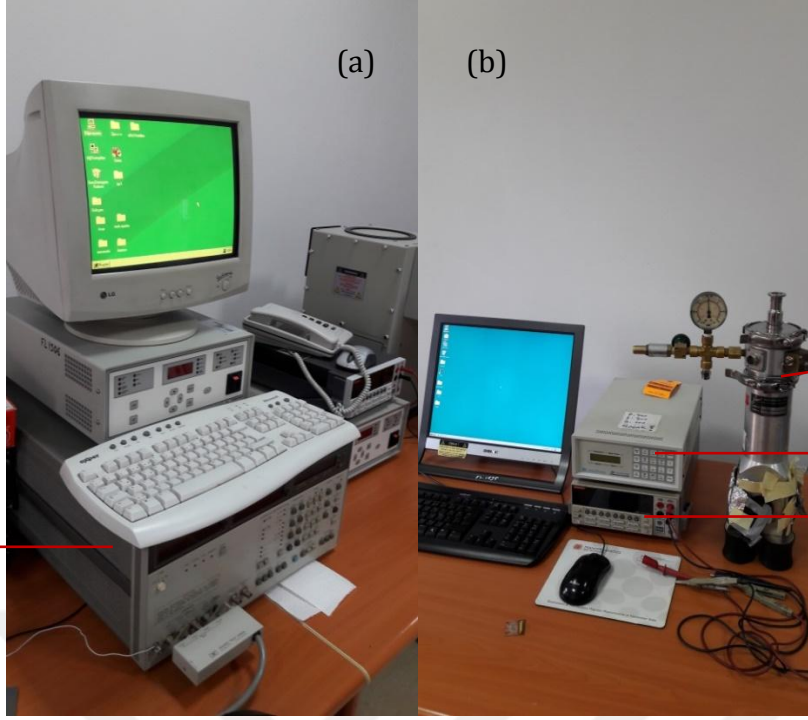
kriyostatına alınan numunelerle HP 4192A LF empedans analizörü yardımıyla (80K-380K) sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir.

Elektriksel ölçümlerin sağlıklı bir biçimde alınabilmesi için farklı ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs/In MIS tipi Schottky bariyer diyotlar Janis VPF475 kriyostatına uygun ebatlardaki bir bakır tutucu üzerine iletken gümüş pasta yardımıyla ayrı ayrı yapıştırılmıştır. Üst doğrultucu kontaklar da gümüş kaplı ince bakır teller kullanılarak ve yine iletken gümüş pasta yardımıyla yapıştırılarak kriyostat tutucusu üzerine sabitlenmiştir. Hazırlanan deneysel ölçüm sistemi Şekil 4.5.' de verilmiştir. Ayrıca tüm ölçümler bilgisayara takılan bir IEEE488 *ac / dc* çevirici kart yardımıyla kumanda edilerek gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.8. Deneysel ölçüm sisteminin şematik gösterimi

Hewlett Packard (HP) 4192A LF empedans analizörü



Resim 4.5. (a) (5Hz-13Hz) aralığında ölçüm yapabilen Hewlett Packard (HP) 4192A LF empedans analizörü (Impedance Analyzer), (b) ($\pm 10\text{pA}$, $\pm 1\text{ A}$) aralığında ölçüm yapabilen Keitley 2400 akım-gerilim (I-V) kaynağı (SourceMeter), Janis VPF475 sıvı azotlu kriyostat sistemi (Liquid Nitrogen Cryostat) ve Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol sistemi (Autotuning Temperature Controller)

Şekil 4.8' de şematik olarak çizilen cihaz ve sistem görüntüleri, Resim 4.5 (a) ve (b)' de Gazi Üniversitesi Fotonik Araştırma ve Uygulama Merkezi Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarı' ndaki (STARLAB) görselleri ile verilmiştir..

4.7.1. Akım-gerilim kaynağı

Keithley 2400 akım-gerilim ölçüm kaynağı, hazırlanan örneklerin doğru ve ters beslem akım-voltaj (I-V) ölçümlerini almak için kullanılmıştır. Resim 4.6' da Keithley 2400 akım-gerilim ölçüm kaynağı görülmektedir. Bu cihazla hem akım kaynaklı gerilim ölçümü hem de gerilim kaynaklı akım ölçümü yapılabilmektedir. $\pm 1\mu\text{V}$ ' dan $\pm 200\mu\text{V}$ ' a gerilim ve $\pm 10\text{pA}$ ' den $\pm 1\text{ A}$ ' e kadar akım ölçebilme gücüne sahiptir. Ayrıca bu aygıt $\pm 0.15\%$ hassasiyetle ölçüm yapabilme ve IEEE-488 ara yüzey kablosuyla dijital verileri *ac/dc* çevirici kart yardımıyla bilgisayara aktarabilme özelliğine sahiptir.



Resim 4.6. Keithley 2400 akım-gerilim (I-V) ölçüm kaynağı

4.7.2. Kapasitans-voltaj ve kondüktans/iletkenlik-voltaj ölçüm sistemi

Frekansa bağlı C-V ve G/ ω -V ölçümlerini almak için Hewlett Packard 4192A LF Empedans analizörü kullanılmıştır. Resim 4.7.' de verilen HP 4192A LF Empedans analizörünün frekans ölçüm aralıkları (5Hz-13MHz) olup, osilatör genlik aralığı (5mV-1V) aralığıdır. Doğru akım, ileri ve ters besleme özelliğine sahip cihazın (-35V)' dan (+35V)' a kadar ayarlanması mümkündür. Aynı anda empedans, admittans, kapasitans ve indüktans ölçümü yapabilmekte ayrıca aralarındaki faz değerleriyle kalite faktörlerini de ölçebilmektedir. $\pm 0.15\%$ hassasiyetle ölçüm yapabilen cihaz IEEE-488 ara yüzey veri yoluna sahip olup ölçme işlemi test point yazılımı yardımıyla bilgisayar üzerinden anlık olarak kontrol edilebilmektedir.



Resim 4.7. Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü

4.7.3. Kriyostat ve sıcaklık kontrol sistemi

Hazırlanan numunelerin I-V ve diğer ölçümleri 4 optik pencereyi Janis VPF475 kriyostat içinde yaklaşık 10^{-2} mbar basınçta gerçekleştirilmiştir. Bu kriyostat, 77K ile 450K sıcaklık aralığında ve ± 0.10 K hassasiyetle ölçüm yapabilmektedir (Resim. 4.8). Ayrıca 4 optik penceresi ile optik ölçümler için de kullanılabilir.



Resim 4.8. Janis VPF475 kriyostat

Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol cihazı yardımıyla da kriyostat içerisindeki sıcaklık otomatik olarak kontrol altında tutulabilmektedir. Bu dijital cihaz ayrıca lineer ısıtma özelliğine sahiptir (Resim 4.9).



Resim 4.9. Lake Shore model 321 sıcaklık kontrol cihazı

5. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Sıcaklık ve voltajın ara yüzey yalıtkan tabakalı ve tabakasız MS Schottky bariyer diyotlardaki akım-iletim mekanizmasını (Current conduction mechanism-CCM) nasıl etkilediğini belirlemek için doğru beslem I-V ölçümlerinin analizinden yararlanılmıştır (Korucu vd., 2012; Çakıcı vd., 2015; Tecimer vd., 2013; Reddy vd., 2014). Bu ölçümlerin sadece oda sıcaklığında ve dar bir voltaj aralığında gerçekleştirilmesi metal ile yarıiletken arasındaki mevcut akım-iletim mekanizması ile bariyer oluşumu hakkında ayrıntılı bilgi verememiştir (Mayimele vd., 2016; Laurent vd., 2016; Kumar vd., 2011; Demirezen ve Altındal, 2010; Yıldırım vd., 2010; Yakuphanoglu ve Şenkal, 2008). Yakın geçmişteki literatür çalışmalarına ayrıntılı bakıldığında GaAs tabanlı olan veya olmayan Schottky bariyer diyotlarda hem bariyer yüksekliğinin (barrier height-BH) hem de idealite faktörünün (ideality factor- n) uygulanan voltaj ve sıcaklık bağıllığına ilişkin çelişkili ölçümlerin ortaya çıktığı görülmüştür (Laurent vd., 2016; Korucu vd., 2012; Rajagopal Reddy vd., 2014). Bu tür cihazların kalitesi ve güvenilirliği; üretim süreci, bariyer yüksekliğinin oluşumu, ara yüzey tabakasının kalınlığı, metal ile yarıiletken arasının homojenliği, ara yüzey ile yarıiletken arasındaki lokalize yüzey durumları (N_{ss}), verici/alıcı atomların katkı konsantrasyonu (N_D/N_A), seri direnç (R_s), cihaz sıcaklığı ve uygulama voltajı gibi çeşitli parametrelere bağlanmıştır (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze, 1981; Hudait vd., 2001; Tung, 1991; Werner ve Gutter, 1991; Schmitsdorf vd., 1995; Chand ve Kumar, 1996; Reddy vd., 2011a, b). Bunların arasında özellikle sıcaklık parametresi, uygulanan gerilim, ara yüzey tabaka, seri direnç ve bariyer homojensizliği pratik uygulamalarda daha önemlidir ve akım-iletim mekanizmasını anlamaya yardımcı olmuştur. Genellikle doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen BH, n ve geleneksel Richardson eğrisi düşük sıcaklıklarda çeşitli anormallikler sergilemiştir. Daha düşük sıcaklıklarda TE ve jenerasyon-rekombinasyon yerine TAE, AE, GD ve yüzey durumları yoluyla tünelleme, baskın akım iletim mekanizması haline gelmiştir (Gülnahar, 2015; Prasanna vd., 2012; Demirezen vd., 2013; Ewing vd., 2007; Horvath, 1988). Çünkü düşük sıcaklıklarda yük taşıyıcıları; bariyer yüksekliğini aşmak için yeterli termal enerjiye sahip değildir. Bu taşıyıcılar sıcaklık arttıkça daha yüksek

engelleri aşabilmek için yeterli enerji kazanabilir. Diğer bir deyişle, yük taşıyıcıları; kusurlar veya yüzey durumları nedeniyle düşük engel yüksekliklerinden tünellenmeye başlarlar. Bu durum, doğru beslem/görünen engel yüksekliğinde (Φ_{b0}/Φ_{ap}) düşüşe; idealite faktöründe artışa sebep olurken diğer taraftan da Richardson eğrisinin lineerlikten sapmasına neden olmaktadır.

Ara yüzey tabakalı olsun ya da olmasın Au/*n*-GaAs Schottky bariyer diyodunda sıcaklığın fonksiyonu olarak mevcut iletim mekanizmaları üzerine birçok çalışma bulunmakla birlikte geniş sıcaklık ve voltaj aralığında, I-V karakteristikleri kullanılarak, her ikisinin de fonksiyonu olan akım-iletim mekanizmasının incelenmesine odaklı bir çalışma bulmak Au/Ti/Al₂O₃/*n*-GaAs (MIS) tipi Schottky bariyer diyotlar için zor olmuştur (Türüt vd., 2015a, b). Çalışmalarda ara yüzey kalınlıkları, semilogaritmik I-V eğrileri ve eğrilerdeki lineer bölgeler birbirinden oldukça farklıdır. Bunların çoğu MS tipi Schottky bariyer diyotlarla ilgilidir. Yukarıdaki açıklamalar göz önünde bulundurularak bu çalışmada Al₂O₃ ara yüzey tabakasına sahip Au/Ti/Al₂O₃/*n*-GaAs SBD için sadece düşük ve yüksek sıcaklıklar değil aynı zamanda düşük ve orta gerilim bölgelerindeki olası akım-iletim mekanizmalarına da odaklanılmıştır (Güçlü vd., 2016a). Bu amaç doğrultusunda Schottky bariyer diyodun mümkün akım iletim mekanizmaları 30K sıcaklık adımlarıyla geniş bir sıcaklık aralığında (80K-380K) doğru beslem I-V karakteristikleri kullanılarak araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar her bir sıcaklık seviyesi için semilogaritmik I-V eğrisinin düşük ve orta doğru beslem bölgelerine karşılık gelen farklı eğimli iki net lineer bölgeye sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu tür doğru beslem I-V eğrileri 'iki paralel diyot modeli' ile izah edilmiş olup bir sonraki bölümde, özellikle düşük sıcaklıklarda yüksek idealite faktörlerine karşılık gelen düşük bariyer yükseklikleri; (Au-Ti)/*n*-GaAs arasının homojen olmamasından dolayı "ortalama bariyer yüksekliklerinin Gaussian dağılımının varlığı" temeline dayandırılmıştır.

MIS yapılar metal ile yarıiletken ara yüzey tabakası ile ayrılmıştır ve M/S arayüzeyinde yüzey durumlarının devamlı bir dağılımı vardır. Genellikle ideal durumda *C* değeri özellikle yüksek frekanslarda frekanstan bağımsızdır. Artan

doğru beslem voltajı ile arttığı görülmüştür ancak bu durum uygulamada oldukça farklı durumlar sergilemiştir. Uygulanan voltaj ve sıcaklıkla C ve G/ω daki değişiklikler genellikle yüzey durumlarının ac sinyalini takip edebilme yeteneğine, yapının seri direncine, M/S arayüzeyindeki yalıtkan tabaka ile iyonizasyon veya polarizasyona süreçlerine bağlanmıştır (Sze, 1981; Nicollian ve Brews, 1982; Nicollian ve Goetzberger, 1967; Rhoderick ve Williams, 1988; Kaya vd., 2016; Arslan vd., 2011; Demirezen, 2013; Card ve Rhoderick, 1971). Diğer bir deyişle genellikle ideal durumdan sapmalara neden olan dört tür olası kaynak vardır. Bunlar; farklı yaşam süreleri (τ), seri direnç (R_s), ara yüzey, iyonlaşma ve kutuplaşmadır (Tataroğlu ve Altındal, 2008; Gökçen vd., 2012b; Çetinkaya vd., 2015; Altındal ve Uslu, 2011). Bu nedenle elektriksel ve dielektrik özelliklerin belirlenmesinde hesaba katılmaları gerekmiştir. Ara yüzey tabakasının MIS arayüzeyindeki kalınlığı, homojenliği, arayüzeydeki bariyer oluşumu elektriksel özellikleri etkileyen önemli parametrelerdir (Arslan vd., 2011; Tunç vd., 2011; Altındal vd., 2009; Bülbül vd., 2010).

(Au/Ti) ve n -tipi GaAs arasındaki bariyer yüksekliği, inhomojenliği nedeniyle ortalama bir değer etrafındadır. Bu nedenle bu çalışmada doğru ve ters beslem C/G-V-T karakteristikleri de geniş bir sıcaklık (200-380K) ve voltaj (± 5) aralığında incelenmiş olup sıcaklıkla voltajın güçlü birer fonksiyonu olarak bulunmuştur. Doğru beslemde C-V eğrileri anormal bir pik davranışı sergilemiş ve daha sonra güçlü yığılım bölgesinde her bir sıcaklık değerinde negatif değerler almıştır. C ve G/ω değerlerinin I' ya karşı olan grafiklerinin negatif kapasitans (NC) davranışı sergilediği görülmüştür. Gözlenen negatif C değerleri yığılım bölgesinde maksimum (G/ω) değerlerine karşılık gelmiştir.

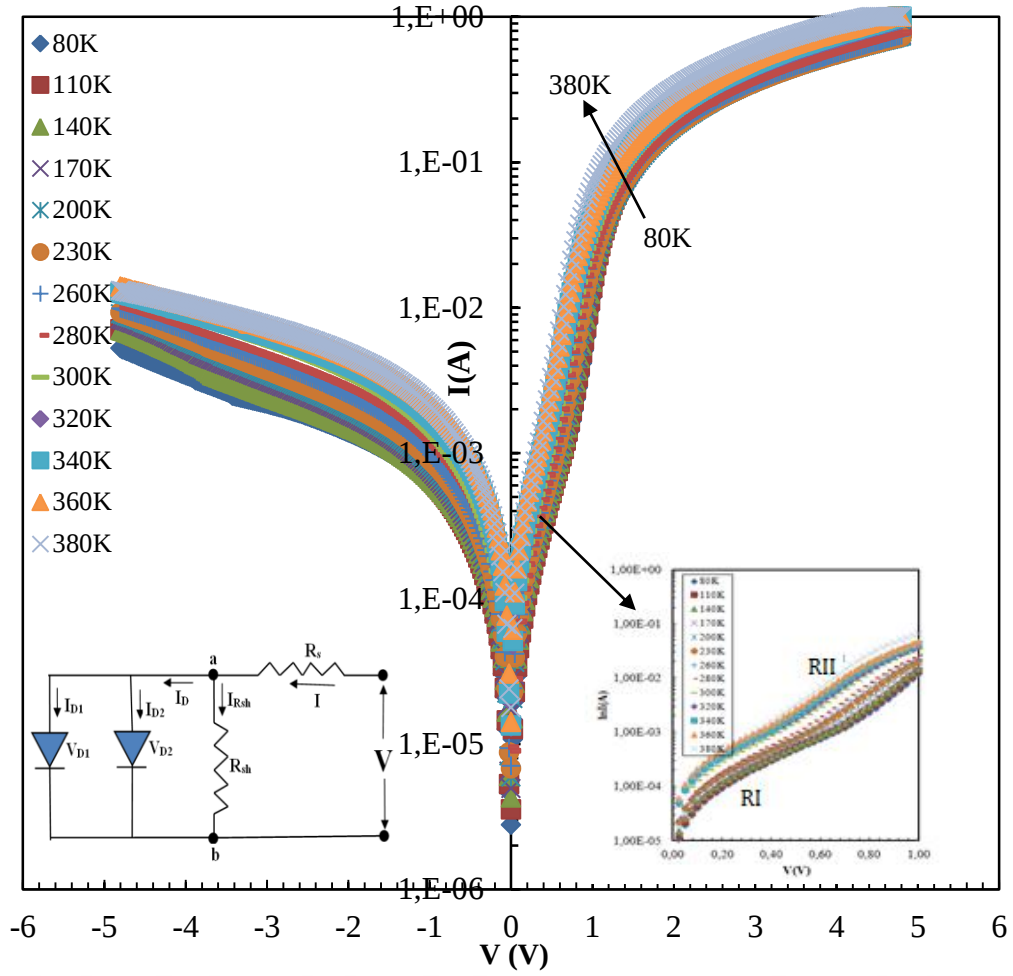
M/S arayüzeyinde ve atlama (hopping) mekanizmalarında bu tür doğal ya da depolanmış ara yüzey ve ara yüzey durumlarının varlığı, yapısal, elektrik ve dielektrik parametreler ve akım iletim mekanizması üzerinde daha etkili olmuştur (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams, 1988; Crowell ve Sze, 1965; Card ve Rhoderick, 1971; Nicollian ve Brews, 1982; Konofaos vd., 1997; Chattopadhyay ve Chaudhuri, 1992; Cova ve Singh, 1990). Yüzey durumları ve oluşturulan ara yüzey, C_m -V, ve G_m/ω -V eğrilerinde voltaj kaymaları

oluşturmuştur (Arslan vd., 2010; Altındal vd., 2008; Yıldırım vd., 2011). N_{ss} , hem tükenim hem de tersinim bölgelerinde etkiliyken R_s sadece yığılım bölgesinde etkili olmuştur. Özellikle yüksek frekanslarda C-V grafiklerinde konkav eğriliğine neden olabildiği görülmüştür (Şahin vd., 2005; Norde, 1979; Sato ve Yasumura, 1985; Cheung vd., 1986; Bülbül vd., 2006; Yücedağ, 2009).

Ara yüzey tabakasının homojenliği, bariyer yüksekliği ve yarıiletkendeki katkı konsantrasyonu atomları, R_s ve N_{ss} ' nin düşük değerleri bu tür cihazların performansını ve kalitesini arttırmada son derece önemlidir (Özdemir vd., 2011; Jandarhanam vd., 2009). Ayrıca sadece tek sıcaklık ve voltaj değerindeki empedans ölçümleri atlama (hopping) mekanizmaları ile bu cihazların karakteri hakkında yeterli bilgi sağlayamamaktadır. Bu ölçümlerin geniş sıcaklık ve voltaj aralığında gerçekleştiriliyor olması ise hem iletkenlik ve hopping mekanizmaları hem de dielektrik durulma ve polarizasyon hakkında daha tatmin edici bilgiler verebilmektedir.

5.1. 30Å Ara Yüzey Oksit Tabakalı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs (MIS) Tipi Schottky Bariyer Diyodun Sıcaklığa Bağlı Akım-Voltaj (I-V) Karakteristikleri

Şekil 5.1' de geniş sıcaklık aralığında (80K-380K) Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs (MIS) tipi Schottky bariyer diyodun tipik ters ve doğru beslem semilogaritmik I-V karakteristikleri görülmektedir. Her sıcaklık seviyesi için semilogaritmik (I-V) grafiği, ileri akımdaki (I_F) üstel artış ve ters akım (I_R) zayıf gerilim bağımlılığıyla iyi bir doğrultma davranışı sergilemektedir. Doğrultma oranı ($RR = I_F/I_R$) azalan sıcaklıkla artar. Her sıcaklık seviyesindeki (I-V) eğrilerinin Bölge I (RI)' e (düşük beslem bölgesi $V \leq 0.3V$) ve Bölge II (RII)' ye (orta beslem bölgesi $0.3V < V \leq 0.7V$) tekabül eden farklı eğimli iki lineer bölgeye sahip olduğu açıktır. Her iki bölgenin daha net görülmesi amacıyla Şekil 5.1' in içerisinde $\ln(I)$ -V grafikleri ayrıca gösterilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi her iki bölgedeki $\ln(I)$ -V eğrilerinin eğimleri ve dolayısıyla elektriksel özellikleri oldukça farklıdır. Bu nedenle bu çalışma her iki bölge için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve gerekli çizelge ve grafikler hazırlanarak muhtemel etkin akım-iletim mekanizmaları mevcut literatür ile kıyaslanarak incelenmiştir.



Şekil 5.1. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun çeşitli sıcaklıklarda semilogaritmik doğru beslem I-V karakteristikleri

R_s etkisinden dolayı ileri doğru beslem $\ln(I)$ -V eğrilerinde lineerlikten sapmalar gözlenir. Ters doyma akımı (I_s) ve n' nin deneysel değerleri sırasıyla, her sıcaklık seviyesindeki iki lineer bölge için doğru beslem ($\ln I$)-V eğrilerinin lineer kısmının $V=0$ için $\ln(I)$ eksenini kestiği ve $\ln(I)$ -V grafiklerinin eğimlerinden Eşitlik (5.1) ve Eşitlik (5.2)'ye göre elde edilmiştir.

$$I = I_{s1} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_1 kT} \right) - 1 \right) + I_{s2} \left(\exp \left(\frac{q(V - IR_s)}{n_2 kT} \right) - 1 \right) + \frac{(V - IR_s)}{R_{sh}} \quad (5.1)$$

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (5.2)$$

Burada n_1, n_2 ve I_{s1}, I_{s2} sırasıyla düşük ve orta beslem (RI ve RII) bölgelerine karşılık gelen idealite faktörleri ve ters beslem doyma akımlarıdır. Bu akımlar sırasıyla aşağıdaki eşitliklerle verilmiştir;

$$I_{s1} = AA^*T^2 \exp(-q\Phi_{b01} / kT) \quad I_{s2} = AA^*T^2 \exp(-q\Phi_{b02} / kT) \quad (5.3)$$

Verilen denklemlerde A diyot alanı veya doğrultucu kontak alanı, A^* etkin Richardson sabitidir ki n tipi GaAs için bu değer $8.16 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ (Altuntaş vd., 2009) olarak alınmıştır. Φ_{b0} sıfır beslem engel yüksekliğini, V diyot üzerine uygulanan voltajı, T Kelvin cinsinden mutlak sıcaklığı, k Boltzmann sabitini, n diyot idealite faktörünü ve IR_s seri direnç üzerine düşen voltajı ifade etmektedir. Böylece elde edilen I_s ile ölçülen A ve teorik A^* değerleri kullanılarak sıfır beslem ya da görünen engel yüksekliğinin (Φ_{b0}) değerleri Eşitlik (5.4) kullanılarak her sıcaklık için elde edilmiştir (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze, 1981).

$$\Phi_{b0} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_s} \right) \quad (5.4)$$

Elde edilen I_{s1}, I_{s2}, n_1, n_2 ve Φ_{b01}, Φ_{b02} deneysel değerleri Çizelge (5.1)' de gösterilmiştir. Çizelge (5.1) ile Şekil 5.2 (a) ve (b)' de verildiği gibi Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun I_s, n ve Φ_{b0} değerleri sıcaklığın kuvvetli birer fonksiyonudur.

Çizelge (5.1)' den takip edilecek olursa sırasıyla bu değerlerden bazılarının R1 için; $1.99 \times 10^{-5} \text{ A}$, 19.51 ve 0.12eV (80K) ve $2.05 \times 10^{-5} \text{ A}$, 4.21 ve 0.59 eV (380K), R2 için; $4.49 \times 10^{-5} \text{ A}$, 30.73 ve 0.11eV (80K), $8.78 \times 10^{-5} \text{ A}$, 4.18 ve 0.61eV (380K) olduğu görülür.

Çizelge 5.1.: Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun doğru beslem I-V karakteristiklerinden elde edilen sıcaklığa bağlı I_s , n , Φ_{bo} ve nT değerleri

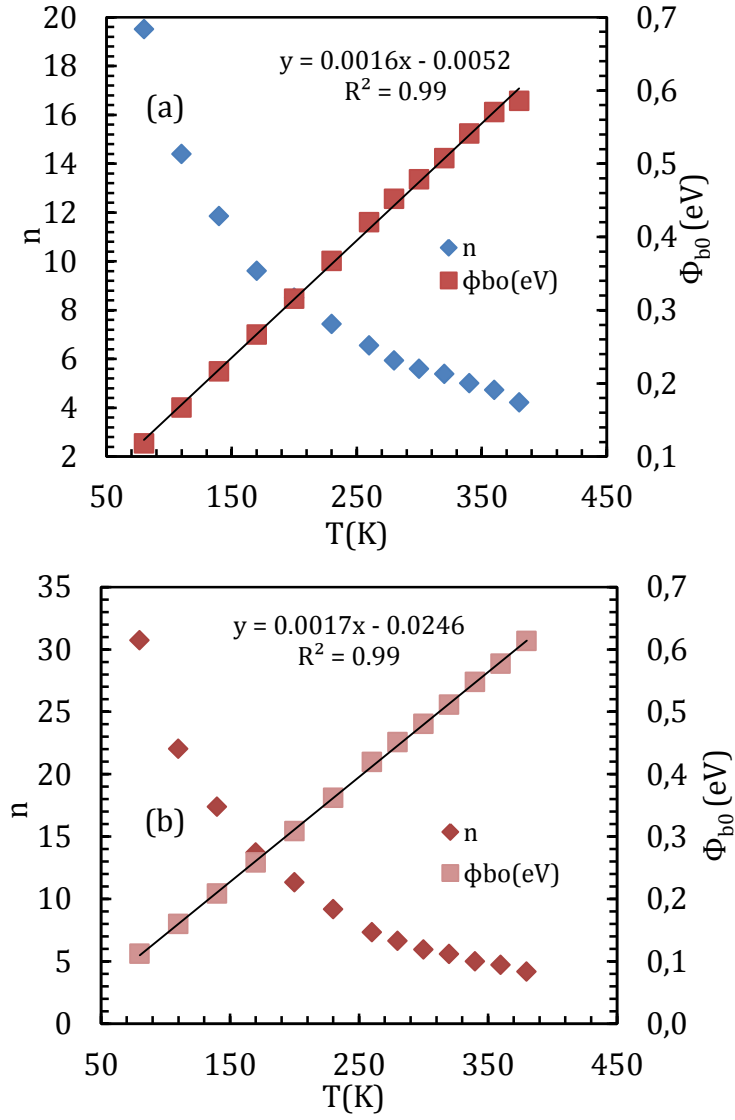
I. Bölge (düşük beslem bölgesi)					II. Bölge (orta beslem bölgesi)			
T(K)	I_{s1} (A)	n_1	Φ_{b01} (eV)	n_1T (K)	I_{s2} (A)	n_2	Φ_{b02} (eV)	n_2T (K)
80	1.99x10 ⁻⁵	19.51	0.12	1561	4.49x10 ⁻⁵	30.73	0.11	2458
110	2.28x10 ⁻⁵	14.39	0.17	1583	4.85x10 ⁻⁵	22.01	0.16	2421
140	2.65x10 ⁻⁵	11.85	0.22	1659	5.13x10 ⁻⁵	17.38	0.21	2433
170	2.98x10 ⁻⁵	9.61	0.27	1633	5.34x10 ⁻⁵	13.71	0.26	2331
200	3.69x10 ⁻⁵	8.50	0.32	1701	5.55x10 ⁻⁵	11.32	0.31	2264
230	3.97x10 ⁻⁵	7.42	0.37	1707	5.10x10 ⁻⁵	9.16	0.36	2106
260	4.05x10 ⁻⁵	6.55	0.42	1702	4.19x10 ⁻⁵	7.32	0.42	1903
280	4.76x10 ⁻⁵	5.94	0.45	1662	4.90x10 ⁻⁵	6.62	0.45	1854
300	6.89x10 ⁻⁵	5.59	0.48	1678	6.37x10 ⁻⁵	5.93	0.48	1780
320	8.69x10 ⁻⁵	5.38	0.51	1722	7.55x10 ⁻⁵	5.57	0.51	1784
340	9.16x10 ⁻⁵	5.00	0.54	1701	7.35x10 ⁻⁵	4.98	0.55	1693
360	1.12x10 ⁻⁵	4.73	0.57	1703	9.07x10 ⁻⁵	4.71	0.58	1697
380	2.05x10 ⁻⁵	4.21	0.59	1599	8.78x10 ⁻⁵	4.18	0.61	1587

n değerinin artan sıcaklıkla azalması literatüre uygun bir davranıştır. Bu değer 1' den çok büyük oluşu ise kısmen ara yüzey durumlarının M/S arayüzeyinde ve yasak enerji aralığındaki özel bir dağılımına, M/S arayüzeyinde yapay veya doğal olarak oluşan yalıtkan tabaka ve engelin biçimine atfedilir. Özellikle düşük sıcaklıklarda elde edilen n değerleri ancak M/S arayüzeyinde oluşan potansiyel engelinin homojensizliği ile açıklanabilir. Düşük sıcaklıklarda yeteri kadar termal enerjiye sahip olamayan elektronlar yüksek engellerden geçemezken düşük bariyerlerden veya diğer adıyla patikalardan (patches) rahatlıkla geçerek akımın artmasına, dolayısıyla n değerinin artmasına yol açmaktadır. Sıcaklığın artmasıyla çok daha fazla sayıda elektron yeterli enerji kazanarak engel üzerinden kendiliğinden geçebilmekte dolayısıyla da n değeri azalmaktadır (Rhoderick ve Williams, 1988; Sze ve Kwok, 2007; Sharma, 1984; Özavcı vd., 2013; Güçlü vd., 2016a; Hudait ve Krupanidhi, 2001; Tung, 1991; Werner ve

Guttler, 1991; Schmitsdorf vd., 1995; Chand ve Kumar, 1996; Gülnahar, 2015; Prasanna Lakshmi vd., 2012; Demirezen vd., 2013; Ewing vd., 2007).

Diğer taraftan Φ_{b0} değeri sıra dışı bir davranış göstererek Şekil 5.2 (a) ve (b)' de görüldüğü gibi artan sıcaklıkla artmaktadır. Φ_{b0} değerinin her iki bölge için sıcaklığa bağlı bu şekildeki artışı yarıiletkenin yasak bant aralığının negatif sıcaklık katsayısına aykırıdır. Ayrıca n' nin bu kadar yüksek değeri sadece M/S arayüzeyi ve N_{ss} ' nin belirli yoğunluk dağılımı ile açıklanamaz (Türüt vd., 2015a, b; Marıl vd., 2015; Huang ve Wang, 2015; Tung, 1992; Lin vd., 2015; Horvarth, 1996).

İki bölge için oda sıcaklığında bile idealite faktörünün yüksek değerleri ara yüzey yalıtkan tabakanın varlığına, görüntü kuvvetin düşüşüne ve bariyer homojensizliğine atfedilmiştir (Korucu vd., 2012; Pakma vd., 2011; Reddy vd., 2011a; Mayimele vd., 2016; Laurent vd., 2016; Kumar vd., 2011; Demirezen ve Altındal, 2010; Tung, 1991).



Şekil 5.2. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun sıcaklığa bağlı doğru beslem n ve Φ_{bo} karakteristikleri (a) RI ve (b) RII için

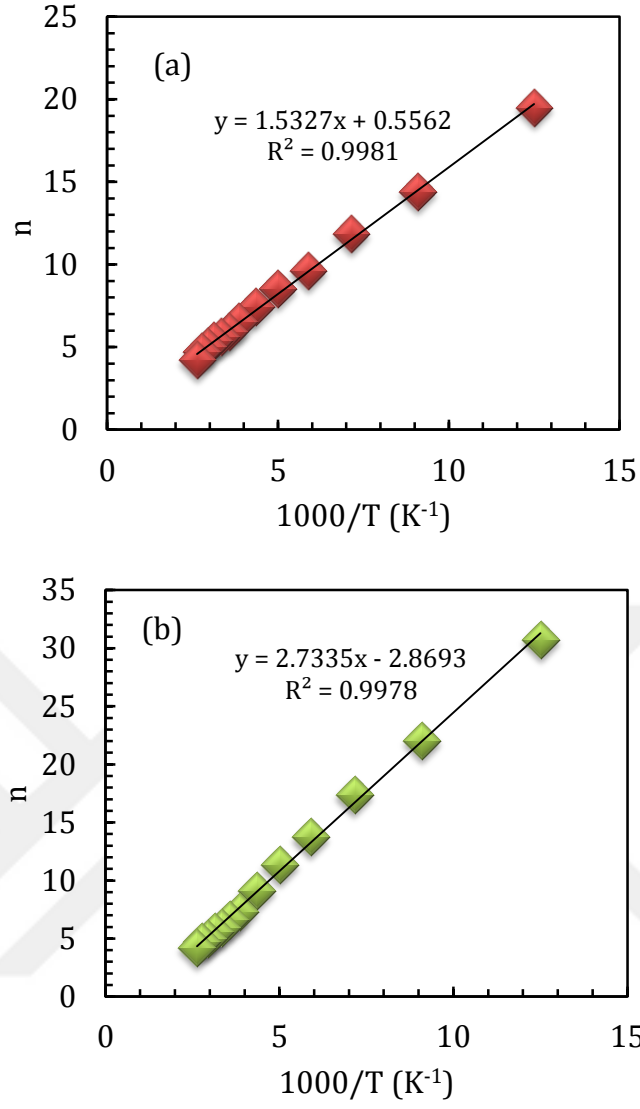
Çizelge (5.1) ve Şekil 5.2 (a) ve (b)' de görüldüğü gibi n değerinin sıcaklıkla değişimi, sıcaklığın tersi ile sırasıyla iki ayrı bölge için Eşitlik (5.5) kullanılarak lineer olarak değişmektedir.

$$n(T) = \alpha + \frac{\beta}{T} = n_0 + \frac{T_0}{T} \quad (5.5)$$

Burada α ve β , n_0 ve T_0 ' a karşılık gelen sabitlerdir. Şekil 5.3 (a) ve (b)' de görüldüğü gibi $n(T)$ ' ye karşı $10^3/T$ grafiklerinden sırasıyla doğrunun düşey eksenini kestiği noktalar ve eğim değerleri 0.556 ve 1533K RI bölgesi için, 2.869

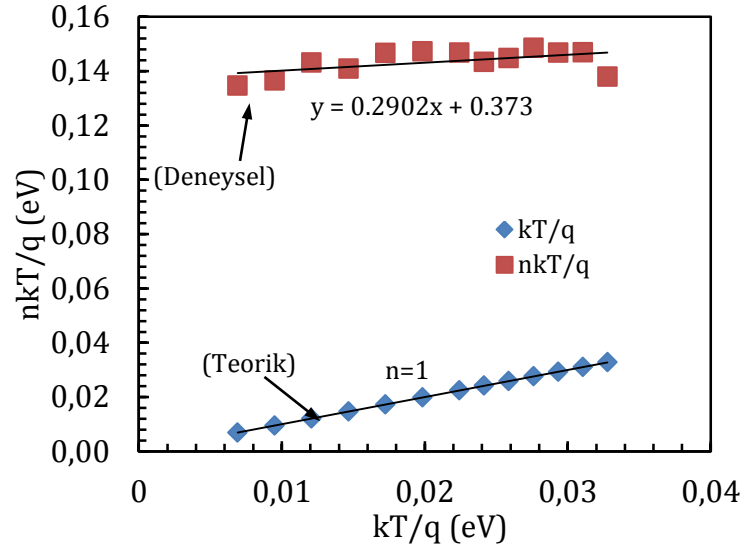
ve 2734K RII bölgesi için elde edilmiştir. Tung (1992)' a göre idealite faktörünün 1' den büyük oluşu ve $10^3/T'$ ye karşı lineerliği homojen olmayan bariyer yüksekliğine inandırıcı bir kanıt olabilir. Ayrıca n' nin sıcaklıkla bu tür değişimi T_0 etkisi ya da anormallliği olarak da adlandırılmıştır (Reddy vd., 2014; Özavcı vd., 2013; Karataş ve Altındal, 2005).

Bilindiği gibi baskın akım taşıma ya da iletim mekanizmaları, genelde yüzey hazırlama işlemlerine, doğal ya da katkılanmış yalıtkan arayüzey tabakasının M/S arayüzeyinde oluşumuna, sıcaklığa, katkı atomlarının yoğunluğuna ve engel homojensizliği gibi çeşitli parametrelere bağlıdır. Çizelge (5.1) ve Şekil 5.2 (a) ve (b)' den de açıkça görüldüğü üzere, azalan sıcaklık ile Φ_{b0} değerlerinde bir azalma ve n değerlerinde ise artış standart TE teorisinden sapmanın bir göstergesidir. Bu durumda TAE ya da AE gibi tünelleme akım iletim mekanizmalarının etkisi göz ardı edilmemelidir.



Şekil 5.3. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII için n -1000/T grafikleri

Çizelge (5.1)' e göre orta beslem gerilimlerinin aksine (nT) değerleri düşük beslem gerilimlerindeki sıcaklıktan neredeyse bağımsızdır. Bu bölge için Schottky bariyer diyodun, $E_0 (= nkT/q)$ ' nun kT/q ' ya karşı grafiği (Şekil 5.4) sıcaklıkla hemen hemen hiç değişmemiştir. Bu durum TAE teorisiyle açıklanabilir.



Şekil 5.4. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotun RI için $(nkT/q)-(kT/q)$ grafikleri

Diğer bir yaklaşımla düşük sıcaklıklardaki n' nin yüksek değerleri ile bariyer yüksekliğinin sıcaklık bağımlılığı, TE' den sapma ya da sadece tünelleme mekanizması, (N_{ss}) ve arayüzeyin varlığıyla da açıklanamayabilir. Bu durum bariyer homojensizliği ile ilişkilidir (Türüt vd., 2015a, b; Marıl vd., 2015; Huang ve Wang, 2015; Tung, 1992; Lin vd., 2015; Horvarth, 1996).

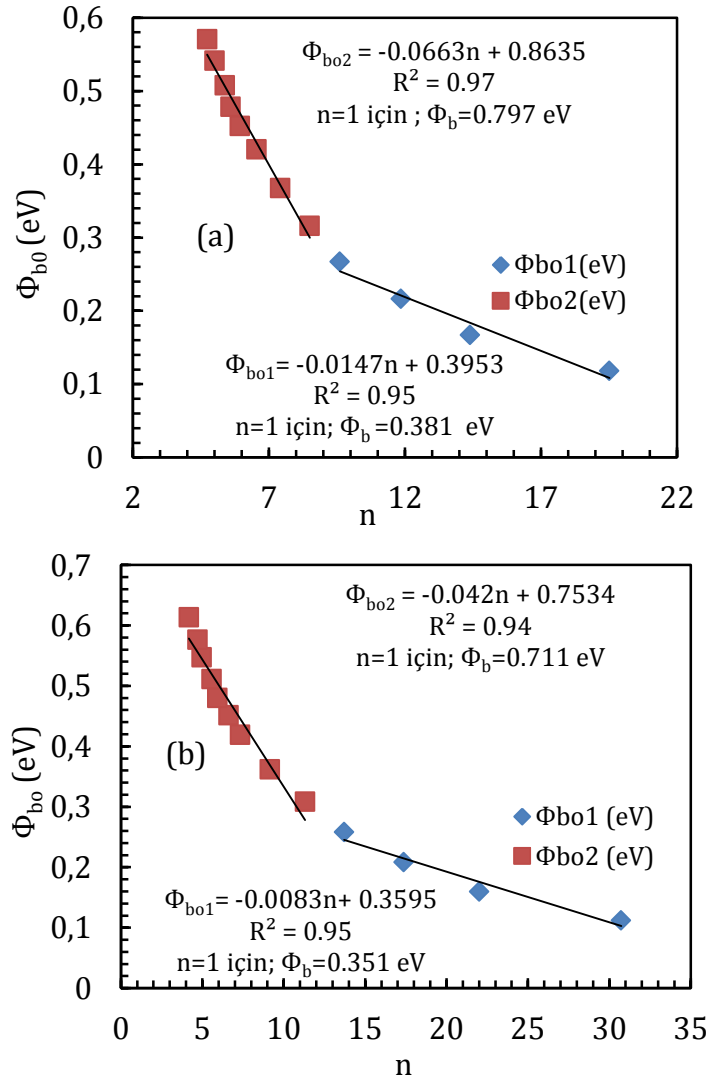
Tung ve arkadaşlarına göre (Tung, 1991; Tung vd., 1992) sıcaklık artışı ile Φ_{b0} 'daki artış daha düşük bariyer yüksekliklerinin varlığıyla veya daha yüksek bariyer yüksekliklerine gömülü yamalar (patches) ile açıklanabilmektedir. Mönch (1999) ayrıca Φ_{b0} ile n arasında lineer bir ilişki olduğunu söylemiştir. Ona göre bu ilişki M/S arayüzeyinde bariyer yüksekliğinin Gaussian dağılımını belirlemiştir.

Bu teoriye göre sıcaklık ile Φ_{b0} ve n' deki değişiklikler aşağıdaki ilişkilerle ifade edilebilir;

$$\Phi_{ap} = \bar{\Phi}_{b0} - \frac{q\sigma_s^2}{2kT} \quad (5.6)$$

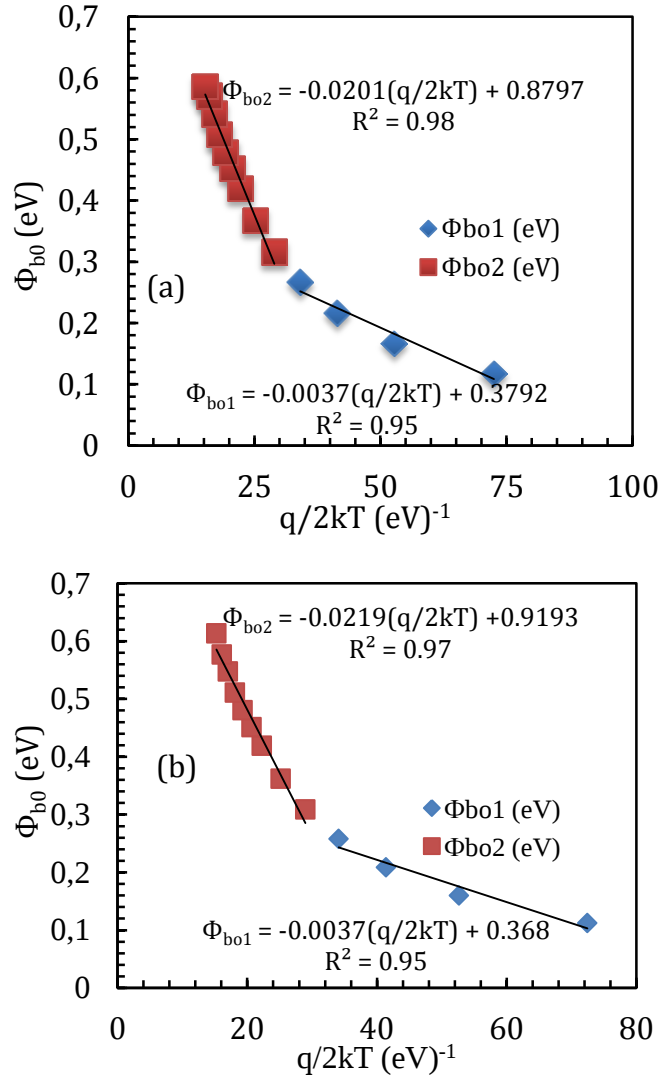
$$\frac{1}{n_{ap}(T)} - 1 = -\rho_1(T) = -\rho_2 - \frac{q\rho_3}{2kT} \quad (5.7)$$

Buradaki eşitliklerde ortalama bariyer yüksekliğinin modifiye değeri ($\bar{\Phi}_{b0}$) ve standart sapma (σ_s), gerilime lineer olarak bağlıdır. $\bar{\Phi}_b = \bar{\Phi}_{b0} + \rho_2 V$ ve $\sigma_s = \sigma_{s0} + \rho_3 V$ ifadeleri ρ_2 ve ρ_3 gerilim deformasyon katsayıları olduğu durumlarda verilebilir. Bu katsayılar sıcaklığa bağlı olabilir ve bariyer yüksekliği dağılımının deformasyon miktarını belirler (Saxena, 1969; Güllü vd., 2008). σ_s 'nin sıcaklık bağımlılığı genellikle küçüktür ve ihmal edilebilir (Arehart vd., 2011; Pakma vd., 2008; Demirezen ve Altındal, 2010; Horvarth, 1996; Schmitsdorf vd., 1995). Φ_{ap} ve n_{ap} nicelikleri sırasıyla görünen engel yüksekliği ve görünen idealite faktörü olarak ifade edilir ve sırasıyla Φ_{b0} ve n' ye karşılık gelir.



Şekil 5.5. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII için deneysel (Φ_{bo}) - n grafikleri

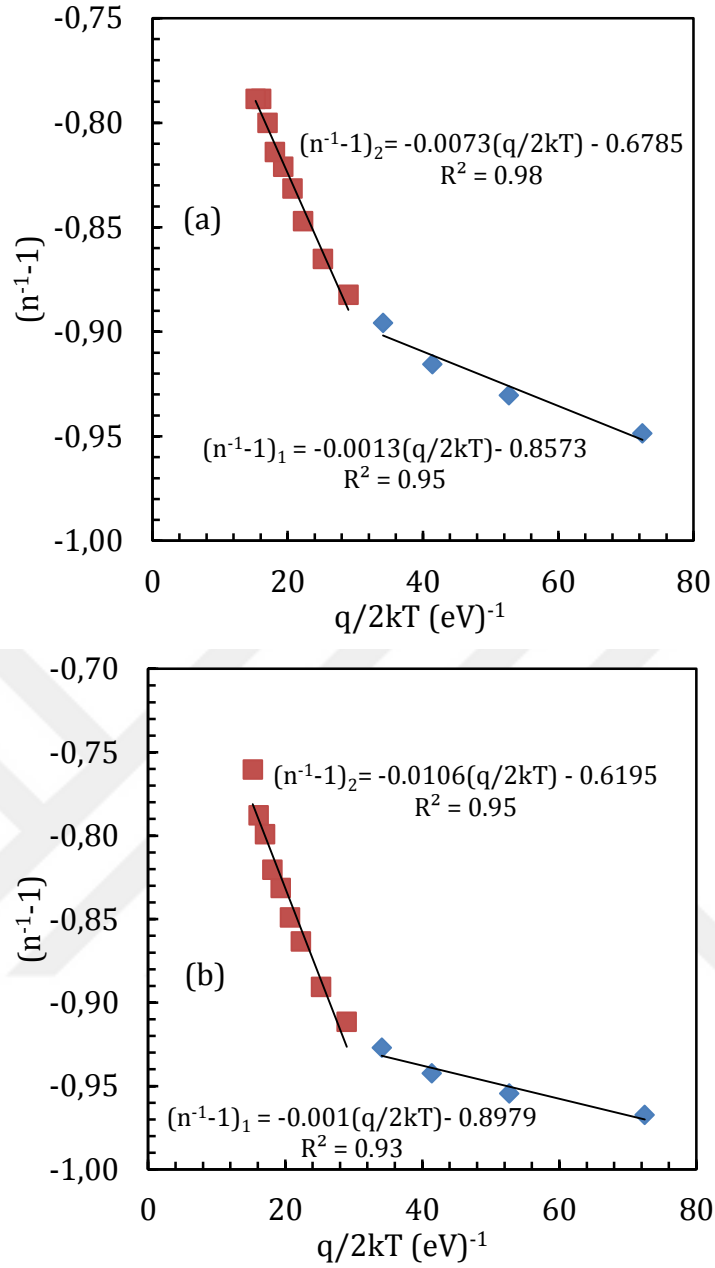
Gaussian dağılımı modelinin kanıtı için Φ_{b0} ' a karşı n ve Φ_{b0} 'a karşı $q/2kT$ grafikleri sırasıyla Şekil (5.5) ve Şekil (5.6)' de iki lineer beslem bölgesi için verilmiştir. Şekil 5.5 (a) ve Şekil 5.5 (b)' de gösterildiği gibi Φ_{b0} ' ın n ' ye göre grafikleri düşük ve orta beslem gerilimlerine bağlı düşük sıcaklık bölgesi (80-170K-LTR) ve yüksek sıcaklık bölgesi (200-380K-HTR) olarak adlandırılan farklı eğime sahip belirgin iki sıcaklık bölgesi için çizilmiştir. Bu grafiklerde doğruların düşük beslem gerilimleri için $n=1$ 'e ekstrapolasyonu, sırasıyla LTR ve HTR için sırasıyla 0.381 ve 0.797 eV olarak bulunmuştur. Bu değerler belirtilen sıcaklık aralıklarındaki ortalama bariyer yüksekliklerinin değerini ($\bar{\Phi}_{b0}$) verir (Şekil 5.5 (a)). Yine aynı şekilde orta beslem gerilimleri için $\bar{\Phi}_{b0}$ değerleri LTR ve HTR için sırasıyla 0.351 ve 0.711 eV olarak bulunmuştur ((Şekil 5.5 (b)).



Şekil 5.6. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII için deneysel (Φ_{b0}) - $q/2kT$ grafikleri

Şekil 5.6 (a) ve Şekil 5.6 (b) incelendiğinde düşük ve orta gerilimler için Φ_{b0}' ye karşı $q/2kT$ grafikleri incelendiğinde Şekil 5.5 (a) ve Şekil 5.5 (b)'ye benzer biçimde çizilen doğruların aynı sıcaklık bölgelerinde farklı eğimli iki lineer bölgeye sahip olduğu görülür. Şekil (5.5) ve Şekil (5.6)'daki bu tarz benzer davranışlar ortalama bariyer yüksekliğine ($\bar{\Phi}_{b0}$) ve standart sapmalara (σ_s) sahip olan Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotta çift Gaussian dağılımının varlığını doğrulamıştır. Literatürde benzer sonuçlar bildirilmiştir (Çakıcı vd., 2015; Prassanna Lakshmi vd., 2012; Demirezen vd., 2013; Demircioğlu vd., 2011; Soylu ve Yakuphanoglu, 2010; Altuntaş vd., 2009). Böylece Şekil 5.6 (a) ve Şekil 5.6 (b)'de düşük ve orta beslem bölgeleri için Φ_{b0}' ye karşı $q/2kT$ grafiklerindeki doğruların LTR ve HTR bölgeleri için Φ_{b0} eksenini kestiği nokta ile eğim değerlerinden sırasıyla Φ_{b0} ve σ_s değerleri elde edilmiştir. Düşük beslem bölgesi için bu değerler sırasıyla LTR' de; 0.379 eV ve 0.061V, HTR' de; 0.880 eV ve 0.142 V (Şekil 5.6 (a)), öte yandan orta beslem bölgesi için bu değerler sırasıyla LTR' de; 0.368 eV ve 0.061 V ve HTR' de; 0.919 eV ve 0.148 V (Şekil 5.6 (b)) bulunmuştur.

Bu anormallikler, yarıiletken yüzeyinin temizlenmesi sırasındaki kimyasal temizlik sürecine atfedilmiştir (Kampen vd., 2002; Roberts vd., 2005). Chand ve Kumar (1996)' a göre çift Gaussian dağılımının varlığı M/S kontakların arayüzeyinin her iki durumda da homojen olmayışının doğasına atfedilebilir. Bu durum ara yüzey kompozisyonu çeşitliliği, ara yüzey kalitesi, elektriksel yükler, non-stokiyometri v.b değişiklikler gerektirebilir.



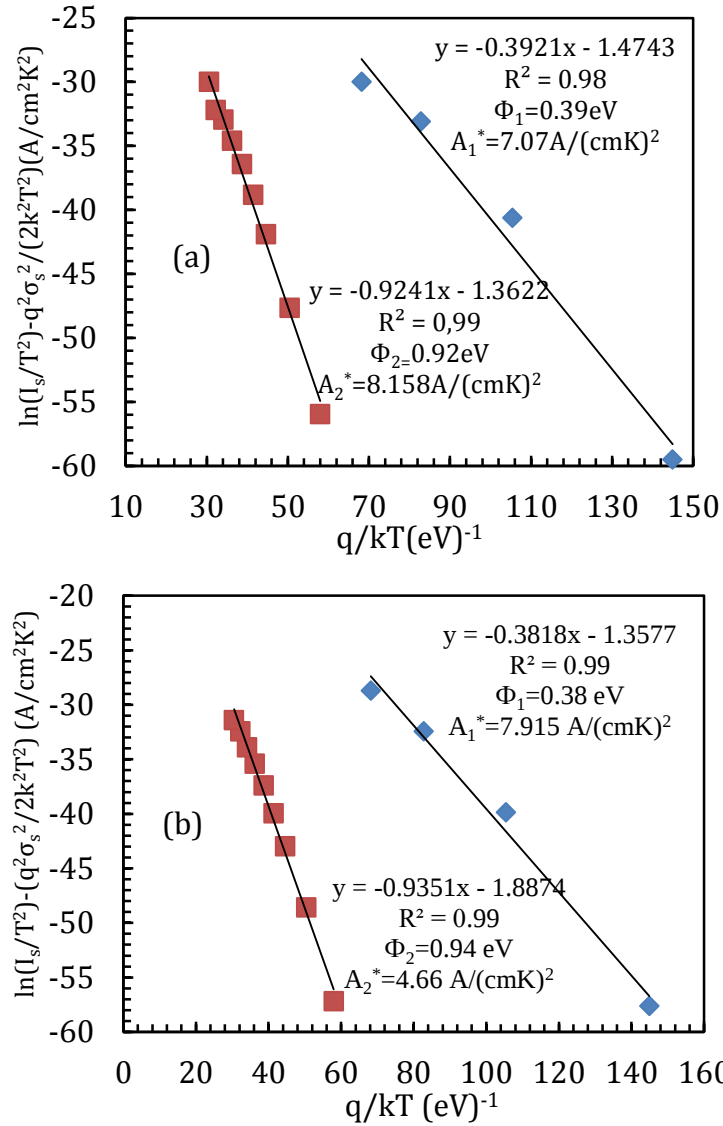
Şekil 5.7. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII için $(n^{-1}-1) - q/2kT$ grafikleri

ρ_2 ve ρ_3 değerleri Şekil 5.7 (a) ve Şekil 5.7 (b)' de sırasıyla grafikteki doğruların $(n^{-1}-1)$ eksenini kestiği noktalar ile doğruların eğiminden, Eşitlik (5.7) kullanılarak düşük ve orta beslem bölgeleri için elde edilebilir. Düşük beslem bölgesi için ρ_2 ve ρ_3 değerleri sırasıyla LTR için -0.8573 ve -0.0013 V; HTR için -0.6785 ve -0.0073 V olarak bulunmuştur. Öte yandan orta beslem bölgesi için bu değerler LTR için -0.8979 ve -0.0010 V; HTR için ise sırasıyla -0.6195 ve -0.0106 V olarak elde edilmiştir.

Şekil (5.5), Şekil (5.6) ve Şekil (5.7) hem bariyer yüksekliğinin hem de idealite faktörünün sıcaklık ve voltaja önemli derecede bağlı olduğunu göstermiştir. Başka bir deyişle imal edilen Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotların izlenen deneysel sonuçları iki farklı akım iletim mekanizmasını ya da ölçülen sıcaklık aralıklarında iki farklı ortalama bariyer yüksekliğinin hakim olduğunu göstermiştir. Yukarıdaki açıklamalar ışığında bariyer yüksekliğindeki homojensizlik ve potansiyel dalgalanma, özellikle düşük sıcaklıklarda doğru beslem I-V karakteristiklerini önemli ölçüde etkilemiştir. Eşitlik (5.3) ve (5.4)'ün bir diğer kombinasyonu da aşağıdaki eşitlikle verilmiştir (Prasanna Lakshmi vd., 2012; Karataş ve Altındal, 2005; Korkut vd., 2009; Bengi vd., 2007; Hackam ve Harrop, 1972; Özdemir vd., 2006) ;

$$\ln\left(\frac{I_s}{T^2}\right) - \left(\frac{q^2 \sigma_s^2}{2k^2 T^2}\right) = \ln(AA^*) - \frac{q\bar{\Phi}_{bo}}{kT} \quad (5.8)$$

Modifiye edilmiş Richardson grafikleri denilen $\ln(I_s/T^2) - q^2 \sigma_s^2 / 2k^2 T^2$, ye karşı q/kT grafikleri ya da diğer adıyla geleneksel aktivasyon enerjileri; düşük ve orta beslem bölgeleri için daha önce elde edilen standart sapmalar kullanılarak sırasıyla Şekil 5.8 (a) ve (b)'de çizilmiştir.



Şekil 5.8. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun (a) RI ve (b) RII bölgeleri için bariyer yüksekliğinin Gaussian dağılımına göre Modifiye Richardson ($\ln(I_s/T^2) - q^2\sigma_s^2/2k^2T^2$ ile q/kT) grafikleri

Görüldüğü gibi bu grafikler düşük ve yüksek sıcaklıklara karşılık gelen iki ayrı lineer bölgeye sahiptir. Ortalama bariyer yüksekliği ($\bar{\Phi}_{bo}$) ve etkin Richardson sabiti (A^*) değerleri bu grafiklerdeki doğruların eğiminden ve düşey eksenini kestiği noktalardan ($= \ln AA^*$) elde edilmiştir. Burada A diyet alanı 0.0325cm² dir. Böylece $\bar{\Phi}_{bo}$ ve A^* değerleri sırasıyla düşük beslem bölgesinde LTR (80-170K) için; 0.39 eV ve 7.07A/cm²K², HTR (200-380K) için; 0.92eV ve 8.158 A/cm²K² (Şekil 5.8 (a)), diğer taraftan orta beslem bölgesi için sırasıyla LTR için; 0.38 eV ve 7.92 A/cm²K², HTR için; 0.94 eV ve 4.66 A/cm²K² (Şekil 5.8 (b)) olarak bulunmuştur. Açıkça görüldüğü gibi Şekil (5.5), Şekil (5.6) ve Şekil (5.8)

birbiriyle uyumlu sonuçlar sergilemiştir. Ayrıca düşük beslem bölgesindeki LTR için elde edilen A^* değeri n -GaAs kristali için $8.16 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ teorik değerine oldukça yakındır (Sze, 1981). Sonuç olarak Au/Ti/Al₂O₃/ n -GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyot için sıcaklığa bağlı akım iletim mekanizması, Au/Ti ile n -GaAs arasındaki bariyer yüksekliğinin homojensizliği nedeniyle, bu yüksekliğin double Gaussian dağılımı ile birlikte termoiyonik emisyon teorisi yardımıyla başarılı bir şekilde açıklanmıştır.

Şekil (5.2), Şekil (5.5), Şekil (5.6), Şekil (5.7) ve Şekil (5.8)' deki grafiklerin tümünden de görüldüğü gibi farklı eğimlere sahip iki doğru mevcuttur. Dolayısıyla bu sonuçlar, ölçülen sıcaklık aralığında bariyer yüksekliğinin sıcaklığa oldukça bağlı olduğunu ve akım iletiminde iki farklı iletim mekanizması ya da iki farklı ortalama engel yüksekliğinin mevcut olduğunu göstermiştir. Buna göre malzememiz için baskın akım iletimi yalnızca TE değil, aynı zamanda engellerin alanında iki Gaussian dağılımı (GD1 ve GD2) olduğunu da göstermiştir. Bunlar da sırasıyla düşük ve yüksek sıcaklıklara tekabül etmiştir. Bu durum herhangi bir gerilim ya da sıcaklık aralığında birden fazla akım iletim mekanizmasının etkin olabileceğini göstermiştir (Chand ve Kumar, 1996).

Buraya kadar tüm anlatılanlar I-V karakteristiğinin Schottky diyotlarına elektriksel etkisinin incelenmesinin özellikle düşük sıcaklıklarda daha önemli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle düşük sıcaklıklardaki I-V ölçümlerinden, kontak alanlarındaki engel homojensizliğinin ortaya çıkarılması ve engel biçimi hakkında daha detaylı bilgi elde etmek mümkündür. Yani sadece oda sıcaklığı ve üzerinde dar bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen I-V ölçümlerinden, hem engelin biçimi hem de muhtemel akım iletim mekanizmaları hakkında detaylı bilgi elde etmek mümkün olamamaktadır. Yüksek sıcaklıklardaki akım iletim mekanizmalarında kazanılan termal enerji ve düşen engel yüksekliği nedeniyle TE teorisi baskın olmaya başlamaktadır.

5.2. Kapasitans-Voltaj (C-V) ve Kondüktans/İletkenlik-Voltaj (G/ω) Karakteristikleri

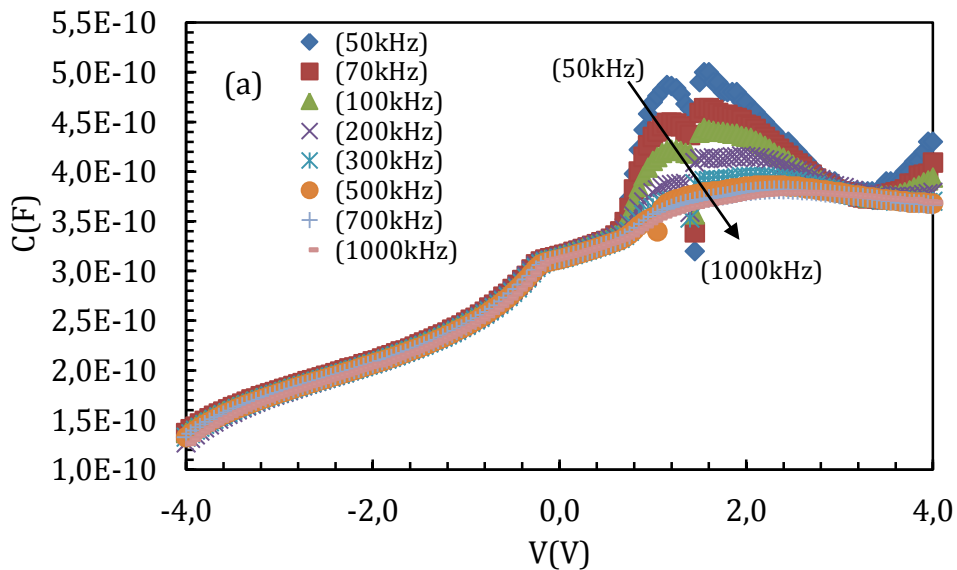
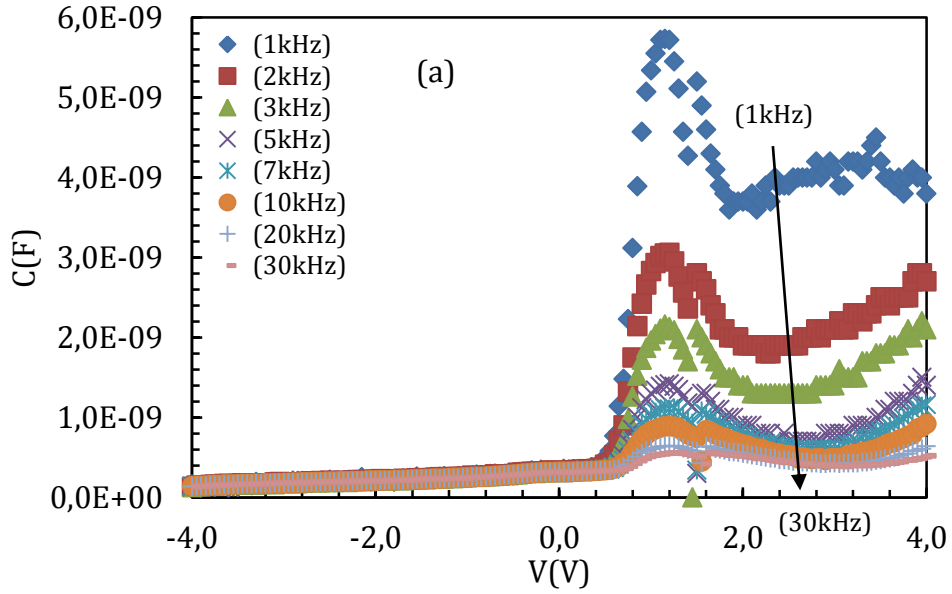
Önceki bölümde üzerinde durulduğu gibi MS veya MIS tipi Schottky bariyer diyotların yalnızca oda sıcaklığında veya dar bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilen doğru ve ters beslem C-V ve G/ω-V ölçümlerinin analizi diyotların akım-iletim mekanizmaları ve metal/yarıiletken (M/S) arayüzeyinde oluşan engelin biçimi hakkında yeterli bilgi sağlayamamıştır. Ancak, geniş bir sıcaklık, frekans ve gerilim bölgesinde, belirli gerilim adımlarıyla gerçekleştirilen ölçümler hem akım iletim mekanizmaları hem de M/S arayüzeyinde oluşan engelin karakteri hakkında detaylı bilgi sağlayabilir. Bu sebeplerden dolayı, bu çalışmada hazırlanan farklı Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotların (1kHz-1MHz) gibi geniş bir frekans aralığındaki C-V ve G/ω-V karakteristiklerinin analizi sırasıyla bu bölümde incelenmiştir.

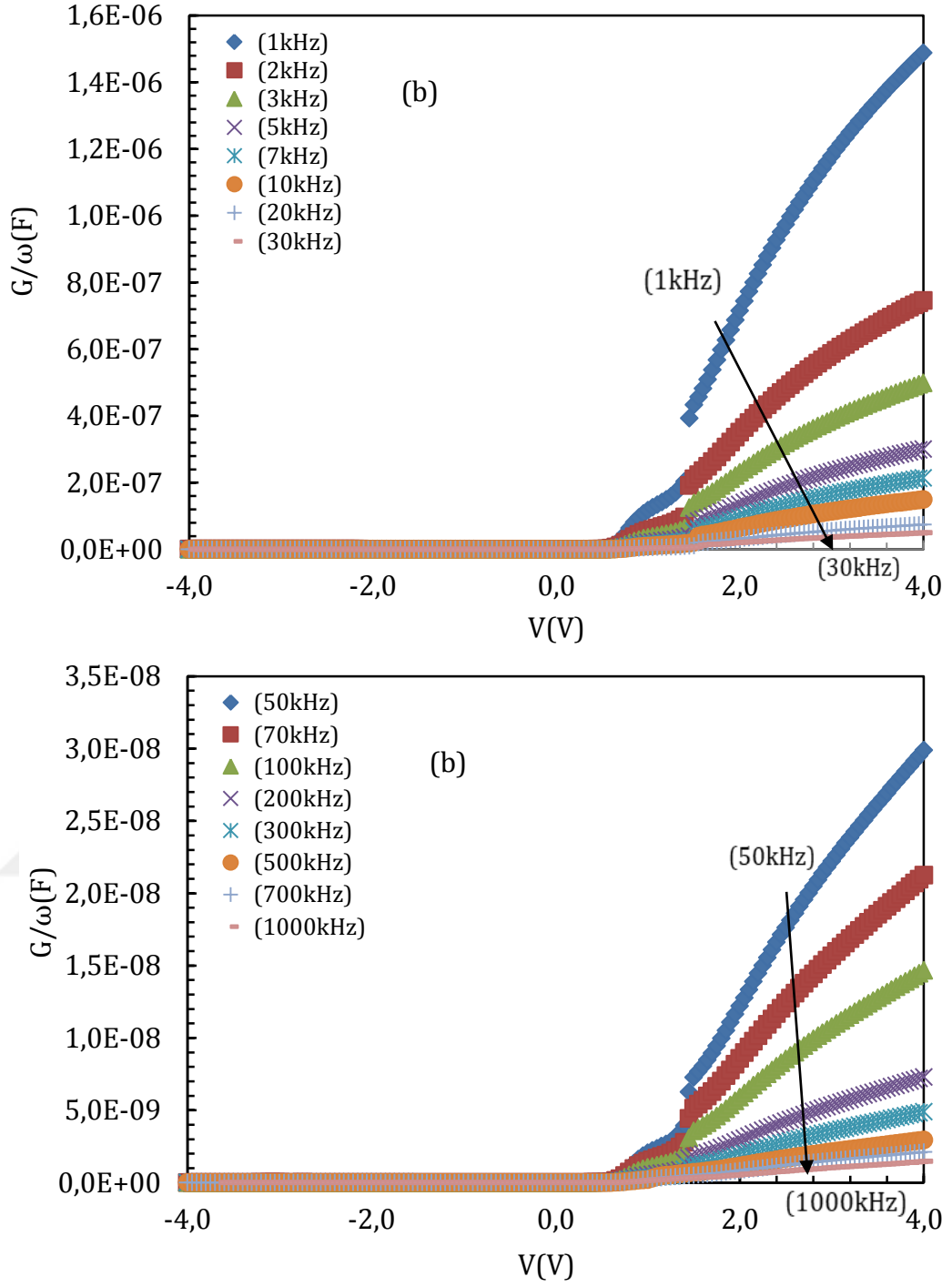
5.2.1. Farklı ara yüzey kalınlıklı numuneler için frekansa bağlı karakteristikler

MS tipi Schottky engel diyotla MIS veya MPS tipi olanların birbirinden farklı özellikler gösterebildiği bilinmektedir (Altındal ve Uslu, 2011). Metal ile yarıiletken arasındaki arayüzeyin varlığı onun C-V ve G/ω-V karakteristiklerini ideal durumdaki MS tipi Schottky engel diyotlara göre önemli ölçüde değiştirmektedir. Şekil 5.9, Şekil 5.10 ve Şekil 5.11 (a) ve (b)' de sırasıyla 30Å, 50Å ve 100Å ara yüzey kalınlıklı numunelerin C-V ile G/ω-V karakteristikleri gösterilmiştir. C ve G' nin birimleri sırasıyla F ve Ω⁻¹ (F veya S) dir. Aynı ölçekte C ve G' nin büyüklüğünü karşılaştırabilmek için genellikle G' nin değeri açısal frekansa bölünür (G/ω).

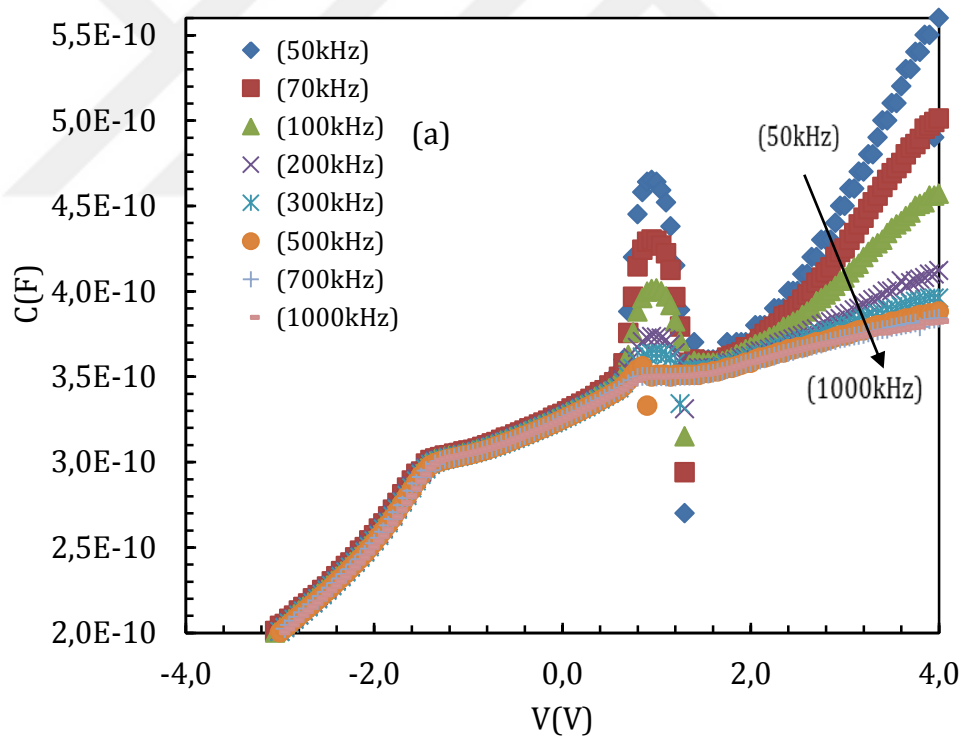
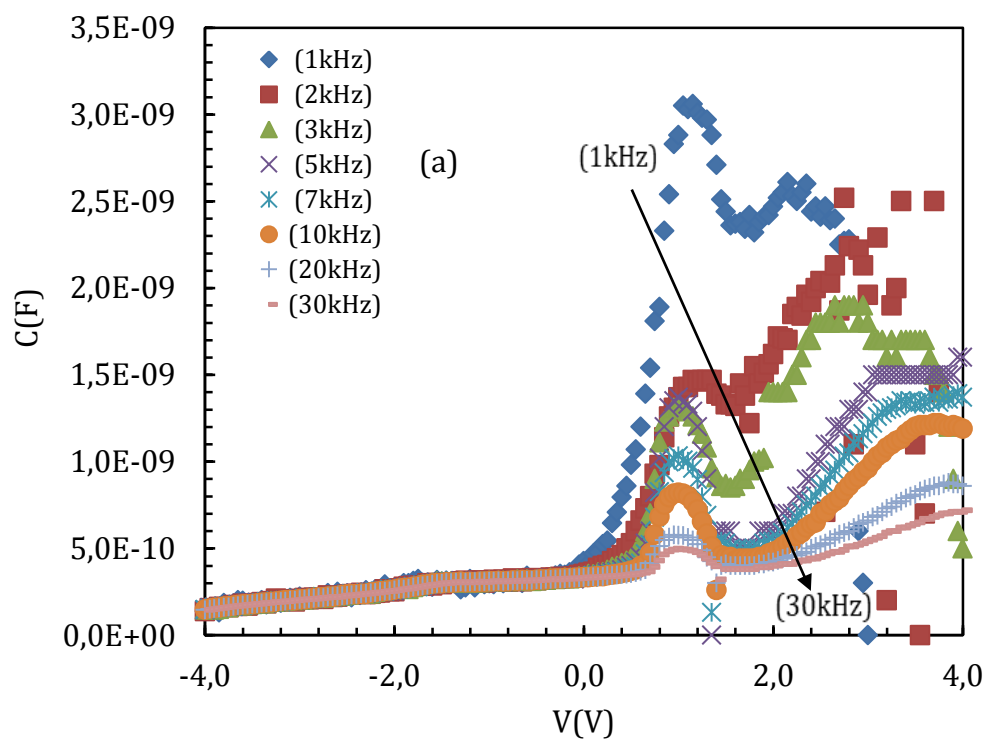
Şekillerden de görüleceği gibi her iki eğri de üç farklı rejime sahiptir; tersinim/inversiyon, tükenim/deplasyon ve birikim (yığılım)/akümülyasyon. C değeri artan frekansla azalmıştır ve R_s ve ara yüzey oksit tabakasının etkisiyle yığılım bölgesinde her frekans değeri için geniş bir pik vermiştir. Yığılım bölgesine uygulanan gerilim ile C değeri azalırken, G/ω değeri artar. Düşük

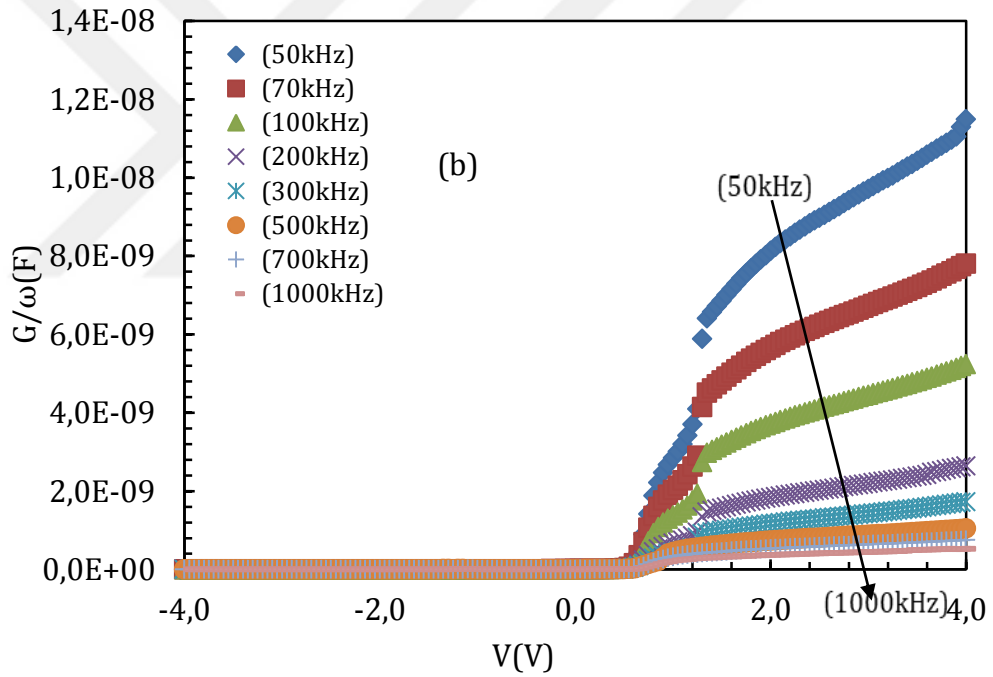
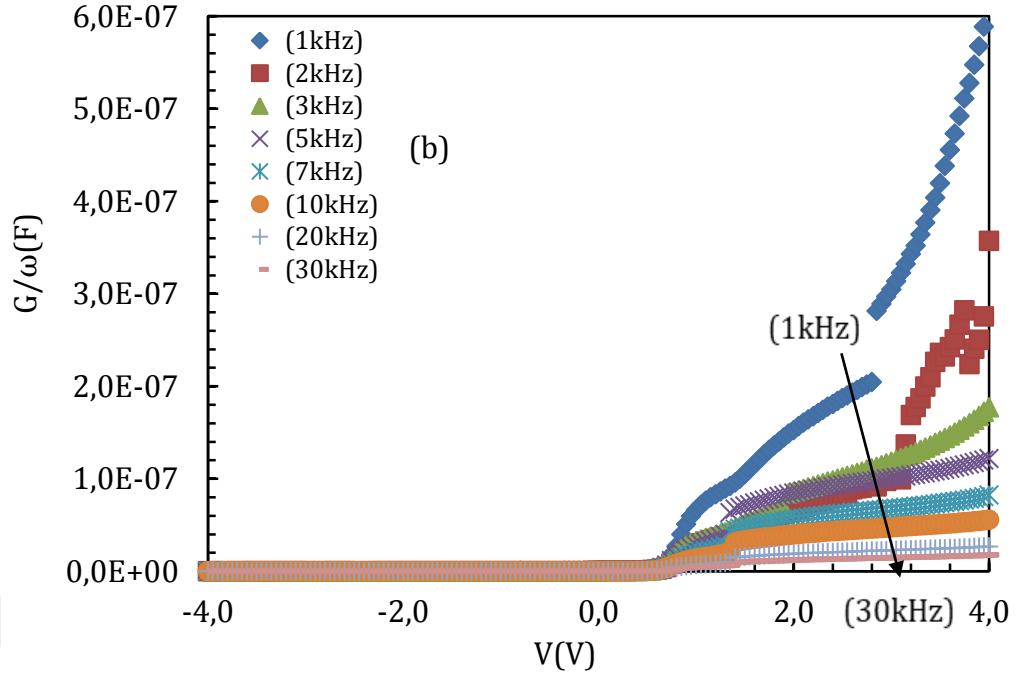
frekanslarda C ve G/ω' 'nın yüksek değerleri, $\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ arayüzeyindeki ara yüzey durum yoğunluğundan kaynaklanan ilave (excess) kapasitans ve kondüktansa atfedilir. Bu, düşük frekanslarda yani periyot değeri tuzaklardaki yükün zaman sabitinden daha yüksek olduğu durumda, N_{ss} 'in *a. c.* sinyali kolay izleyebildiğini ve dolayısıyla diyot kapasitansına ve iletkenliğine katkıda bulunabildiğini göstermiştir. (Nicollian ve Brews, 1982; Symth, 1955; Daniel, 1967). Düşük frekansın aksine ($f \geq 1\text{MHz}$), oldukça yüksek frekanslarda N_{ss} , *a. c.* sinyali hemen hemen hiç takip edemez ve ölçülen kapasitans (C_{ma}) ve iletkenliğe (G_{ma}) katkıda bulunamaz. Diğer bir deyişle, yüksek frekanslarda taşıyıcı ömrü τ , $T=(2\pi f)^{-1}$ 'den çok daha büyüktür. Bu nedenle ara yüzey tuzaklarındaki yükler düşük frekansların aksine *a. c.* sinyali takip edemez.



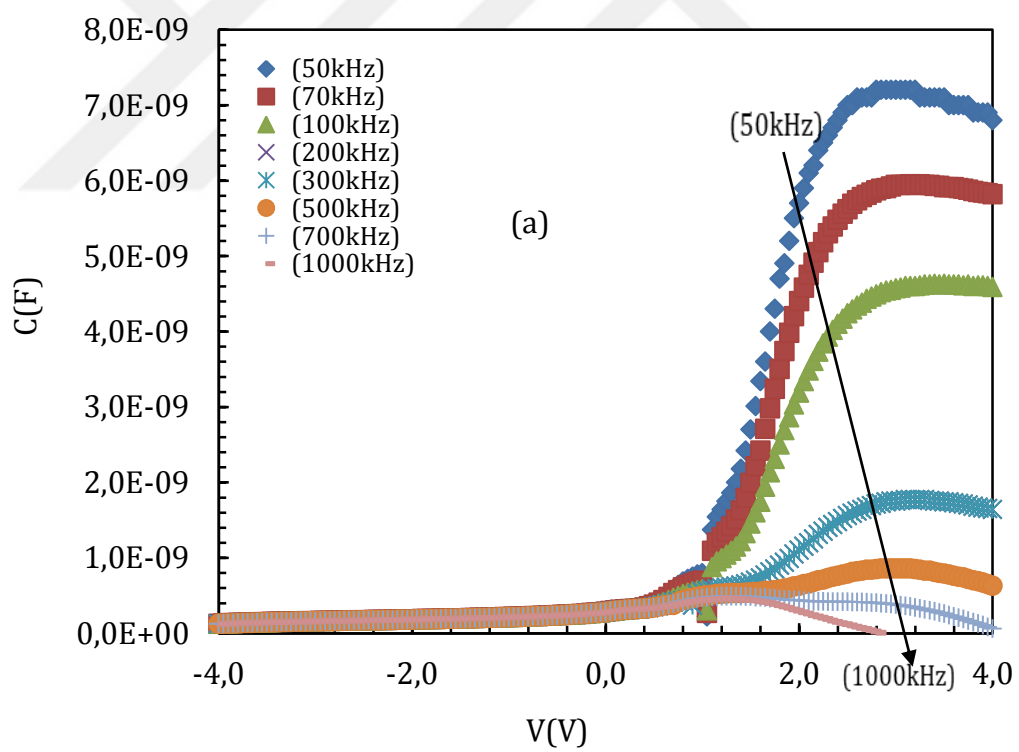
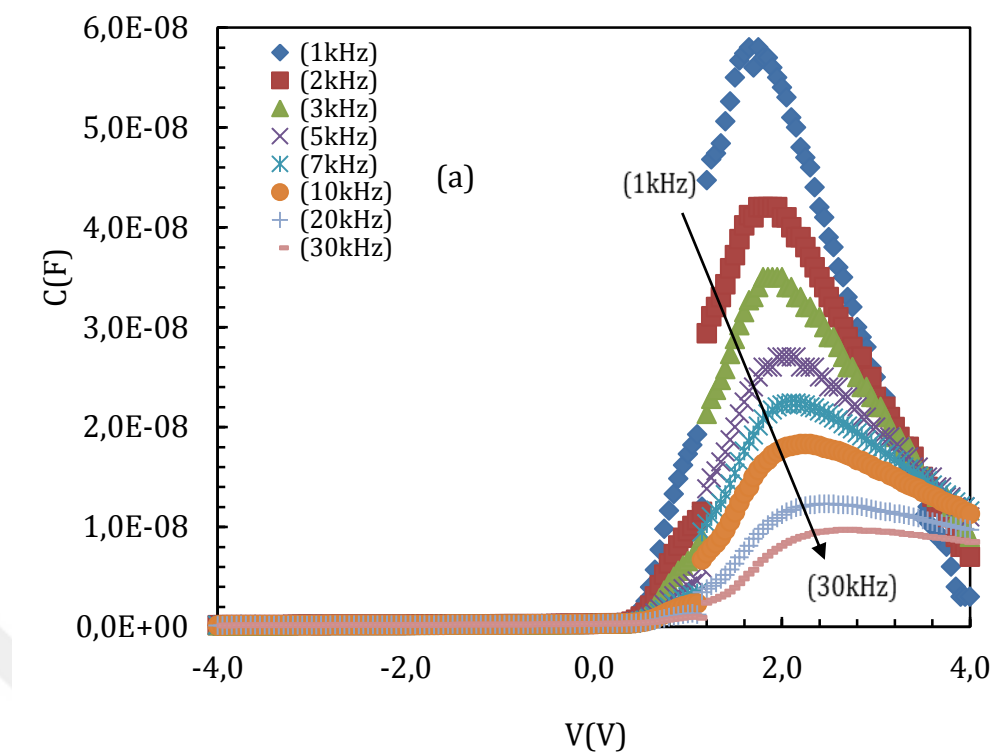


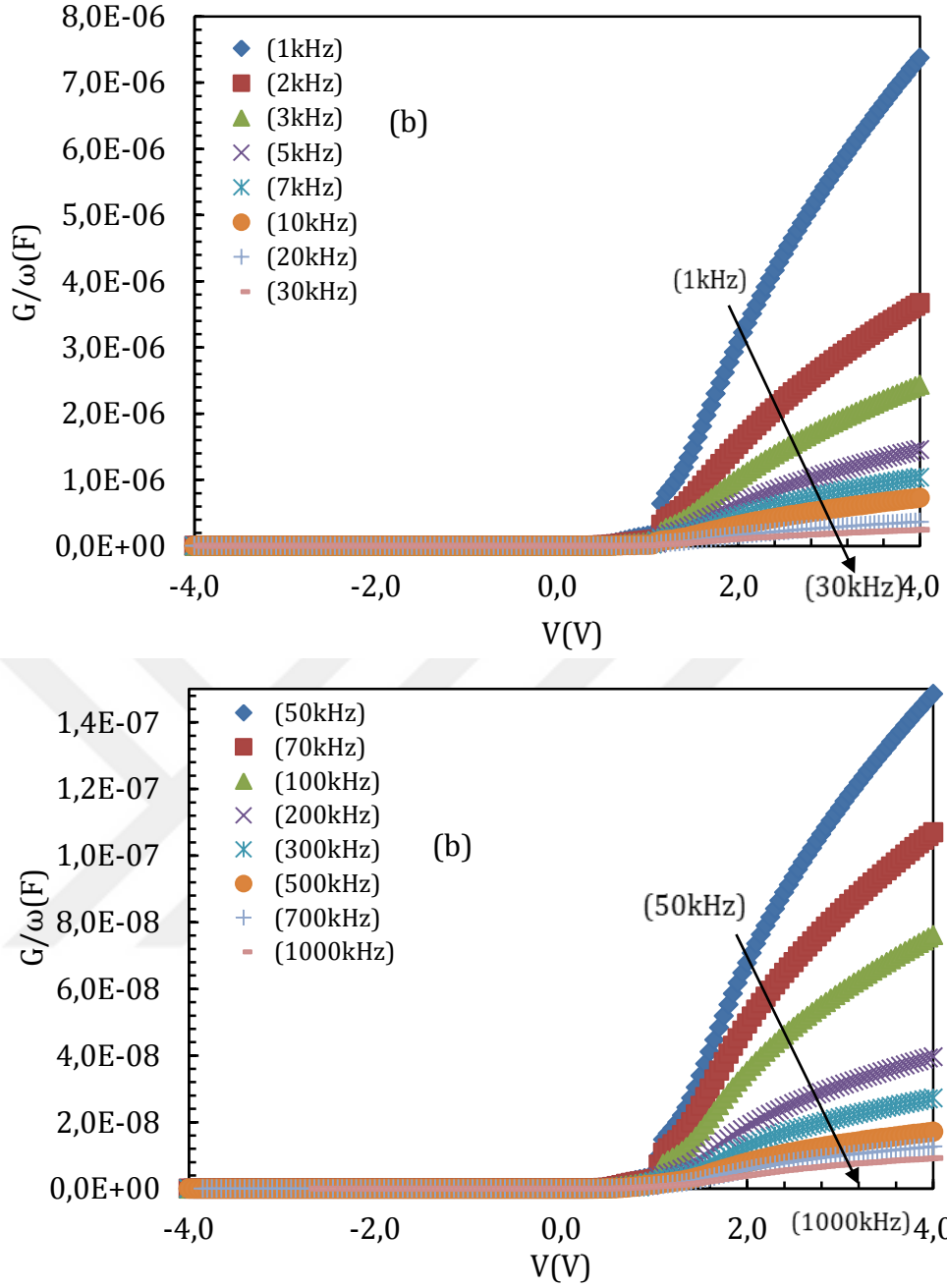
Şekil 5.9. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki a) C-V, b) G/ω -V karakteristikleri (Karakteristikler, 1kHz-30kHz ve 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için ayrı ayrı çizilmiştir.)





Şekil 5.10. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki a) C-V, b) G/ω -V karakteristikleri (Karakteristikler, 1kHz-30kHz ve 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için ayrı ayrı çizilmiştir.)





Şekil 5.11. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki a) C-V, b) G/ω -V karakteristikleri (Karakteristikler, 1kHz-30kHz ve 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için ayrı ayrı çizilmiştir.)

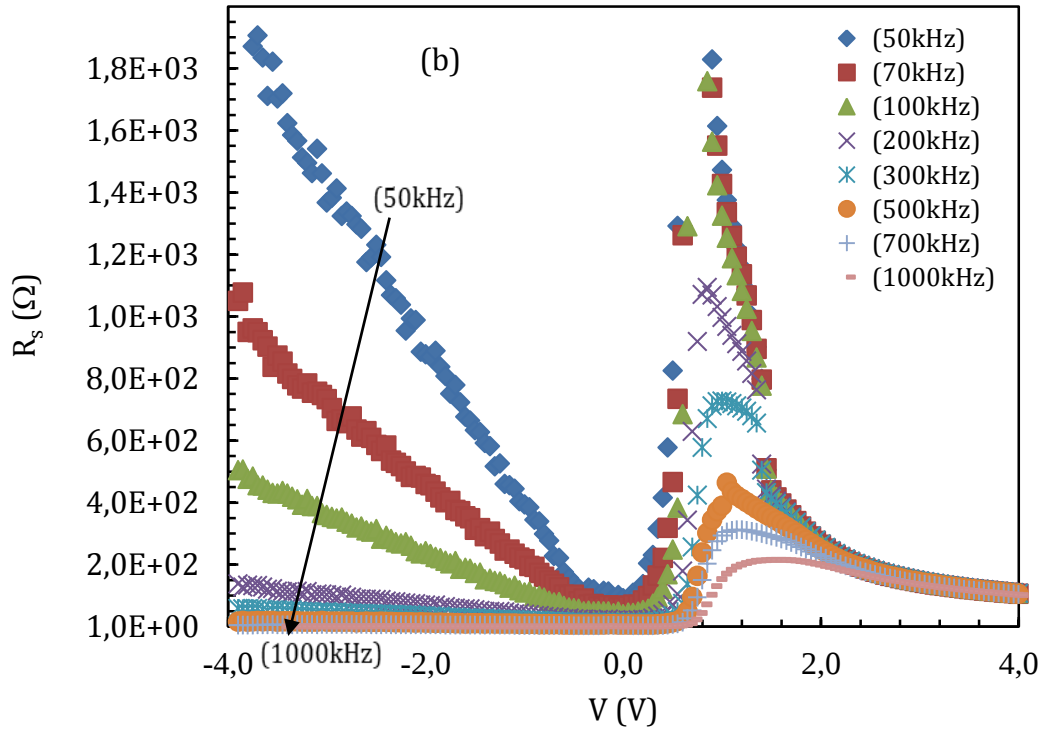
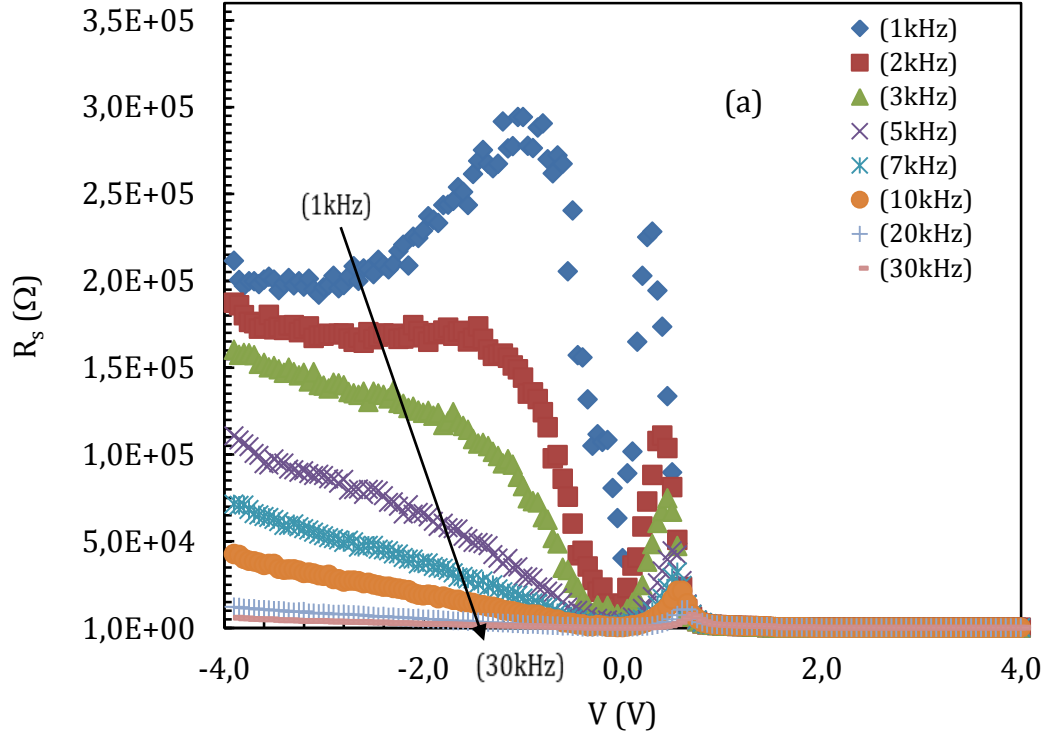
Şekil (5.9), Şekil (5.10) ve Şekil (5.11)' den görüldüğü gibi MIS tipi Schottky bariyer diyotların her bir frekans değerinde C-V eğrilerinin sırasıyla tükenim, tersinim ve yığılım bölgelerine sahip olduğu görülmüştür. C değerleri uygulanan voltaj ile artmış ve sonra 30Å arayüzey kalınlıklı numune için Şekil 5.9 (a)' da (~1V) civarında, diğer artan kalınlıklı numuneler için ise kuvvetli yığılım bölgesine doğru kayarak belirgin bir pik vermiştir. Her bir numune için C' nin

doğru beslem bölgesinde verdiği bu piklerin yüksekliklerinin frekans arttıkça azaldığı görülmektedir. Bu durum, farklı yaşam ömürlerine sahip arayüzey durumlarının var olması nedeniyle onların dışarıdan uygulanan *a. c.* sinyali düşük frekanslarda takip edebilirken (yani periyot değeri tuzaklardaki yükün yaşam ömründen/zaman sabitinden daha yüksek olduğundan), yüksek frekanslarda ($f \geq 0.5\text{MHz}$) takip edemeyişlerinden kaynaklanmıştır. Bu davranış, arayüzey durumu veya arayüzey tuzagında yükün frekans ve gevşeme zamanına bağlıdır. Böylece düşük frekanslarda deneysel C_m ve G_m değerlerine yüzey durumlarından gelen katkı ile toplam kapasitansa ilave kapasitans (C_{ex}) ve kondüktans (G_{ex}) etkisi dahil edilir. Doğru beslem C-V eğrilerindeki bu pikler N_{ss} ' in yoğunluk dağılımına, R_s ' ye ve yüzey kutuplaşmasına atfedilir (Nicollian ve Brews, 1982; Özavcı, 2014; Bilkan, 2016). Frekans arttıkça kapasitansın azaldığı görülmüştür. N_{ss} ' lerden dolayı meydana gelen katkı gittikçe azalacağı için sonraları kapasitans değeri hemen hemen sabit olacaktır. Yaklaşık 1MHz' den sonra da bu katkının tamamen ortadan kalktığı görülmüştür. Ayrıca C-V ve G/ω -V ölçümlerinde arayüzey durumları tersinim ve tükenim bölgelerinde etkili olurken seri direncin yığılma bölgesinde etkili olduğu görülmüştür (Yücedağ vd., 2006). Özellikle 30Å ve 50Å ara yüzey kalınlıklı numunelerin C-V eğrilerinin de kuvvetli yığılma bölgesinde (1.5V-2V) R_s ' den dolayı ilave bir pik verdiği görülmüştür.

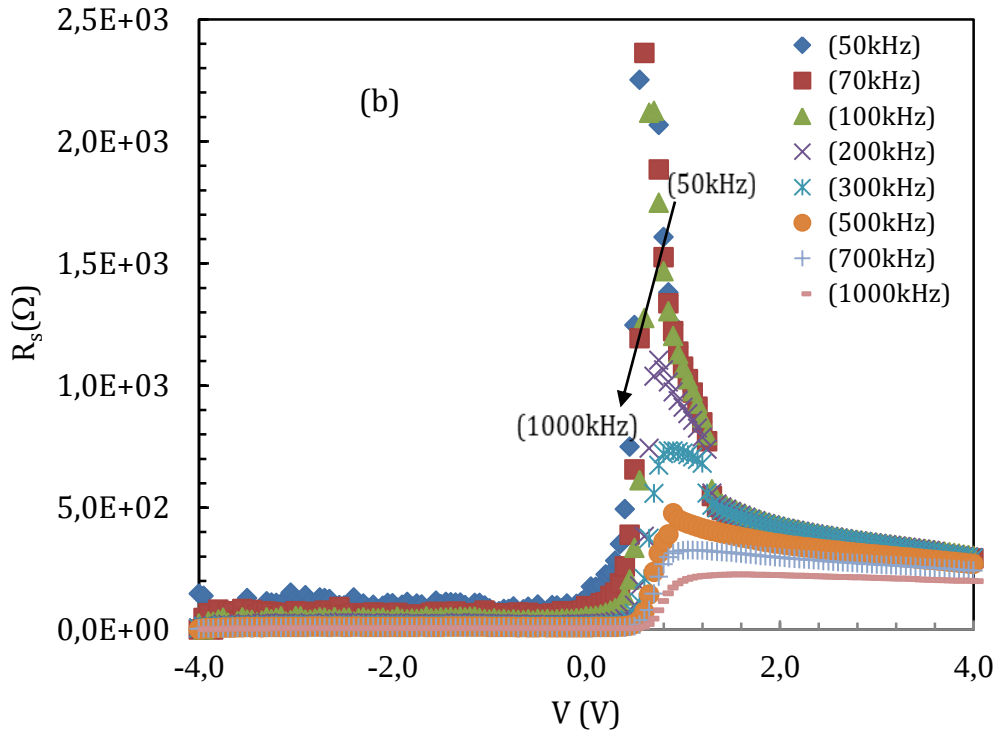
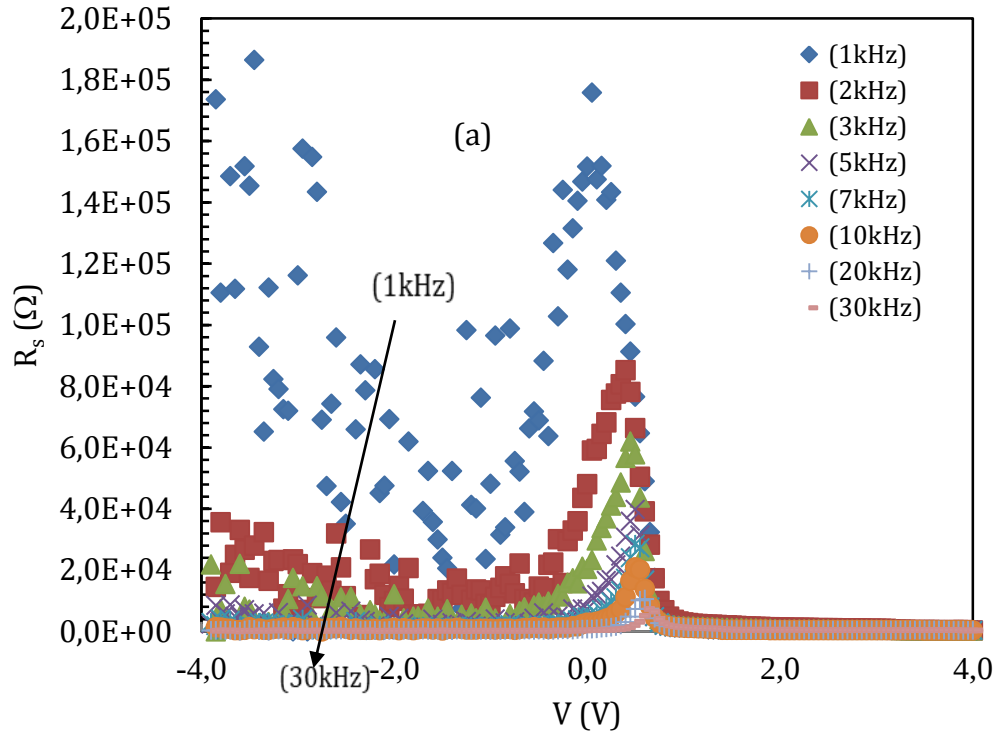
Doğru beslem C-V eğrilerindeki bu pik davranışı ile ilgili literatürde deneysel ve teorik çalışmalar mevcuttur (Afandiyeva vd., 2008; Chelkowski, 1980; Ho vd., 1986; Wu ve Yang, 1989). Burada sadece birkaçına değinilen çalışmalarda da yığılma bölgesindeki C-V eğrilerinde anormal pik davranışları N_{ss} ' lerin varlığına atfedilmiştir. Diğer taraftan doğru beslem C-V eğrisindeki anormal pikin nedeninin de R_s olduğuna yönelik çalışmalar da literatürde mevcuttur (Werner vd., 1988; Batı vd., 2000; Yücedağ, 2009). Ayrıca Wu ve Yang (1989) ile Chattopadhyay ve Raychaudhuri (1992) çalışmasında deneysel C-V eğrilerindeki anormal pik davranışlarının hem R_s hem de N_{ss} ' ye bağlı olduğuna özellikle dikkat çekmiştir.

Kapasitansın aksine sırasıyla her bir numune için çizilen Şekil 5.9 (b), Şekil 5.10 (b) ve Şekil 5.11 (b) grafiklerindeki G/ω değerleri her bir frekans için minumum noktaya sahip iken ki bu durum yüksek gerilimlerin indüktif davranışına bağlanabilir (Özavcı, 2014). C değerleri aynı doğru beslem değerlerinde hızlı bir şekilde artmaya başlamış ve C' nin ileri doğru beslem bölgesinde maksimum değerini almıştır. Yani diğer bir deyişle minimum kapasitans değeri maksimum iletkenlik değerine karşılık gelmiştir. C değeri düşüşe geçerken G değeri yükselmiştir.

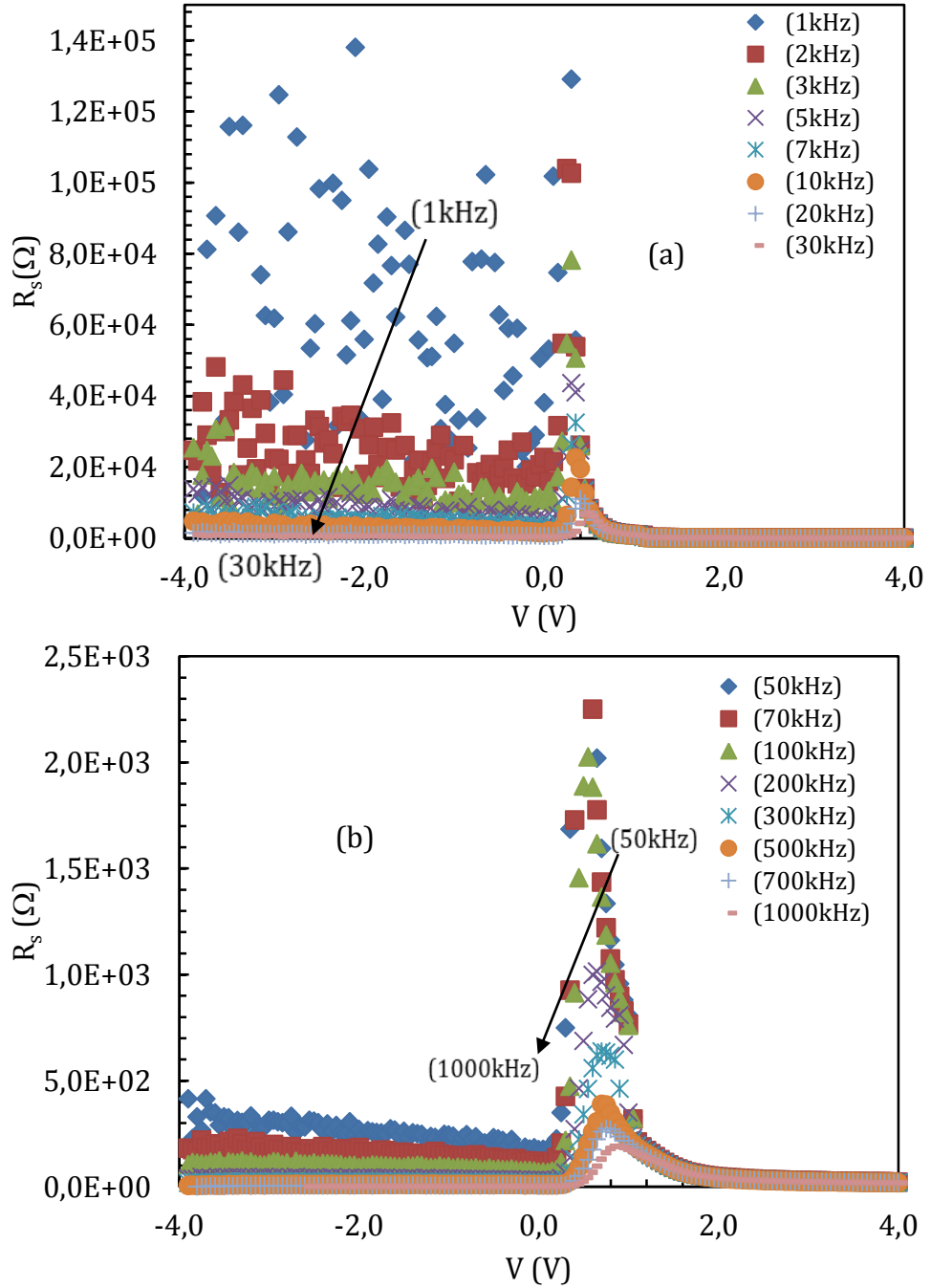
Yukarıda bahsi geçen tüm görüşlerin ışığında yığılma bölgelerinde bulunan birinci pikin, N_{ss} varlığına ve onların yarıiletkenin yasak enerji aralığındaki özel dağılımına; diğer pikin ise R_s ve ara yüzey tabakasının varlığına bağlanabileceğini söyleyebiliriz.



Şekil 5.12. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki R_s - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



Şekil 5.13. 50Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki R_s -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



Şekil 5.14. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki R_s -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için

C ve G/ω değerlerinin her ikisinin de hem frekansa hem de voltaja bağlı değiştiği açıkça görülmüştür. C ve G/ω' daki voltaja bağlı değişimi tersinim bölgesinde önemsiz iken tükenim ve yığılm bölgelerinde oldukça etkin olmuştur. C ve G/ω' daki tüm değişiklikler düşük frekanslarda oldukça belirgindir. C-V eğrilerindeki düzensiz pikler temel olarak atomik yeniden

yapılanmaya ve ara yüzey durumlarının yeniden düzenlenmesine bağlanmıştır (Sze ve Kwok, 2007; Özdemir vd., 2006). Diğer taraftan Şahin vd. (2005) çalışmasında kapasitansın pik değerinin seri dirence göre değiştiğini ve arayüzeyin Schottky bariyer diyotlarının C-V eğrisinde artışa veya pik oluşumuna yol açtığını göstermiştir.

Nicollian ve Brews (1982) tarafından geliştirilmiş olan admittans metodu ile Schottky bariyer diyotlarda gerçek R_s değeri, güçlü yığılım bölgesinde herhangi bir voltajda ölçülen kapasitans (C_{ma}) ve iletkenlik (G_{ma}) değerleri kullanılarak Eşitlik (5.9)' dan belirlenebilir. Ayrıca, diyodun gerilime bağlı direnci (R_i) herhangi bir uygulama gerilimine bağlı olarak aynı denklemden elde edilebilir. Kuvvetli yığılım bölgesindeki direncin değeri diyodun reel seri direncine karşılık gelir.

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + \omega^2 C_{ma}^2} \quad (5.9)$$

Farklı ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotlar için voltaja bağlı R_s ya da R_i profilleri Eşitlik (5.9) kullanılarak sırasıyla Şekil 5.12, Şekil 5.13 ve Şekil 5.14 (a) ve (b)' de geniş frekans aralığı iki ayrı frekans bölgesine ayrılarak gösterilmiştir. Bu grafiklerde R_s değerinin tersinim, tükenim ve yığılım bölgelerindeki değişiminin izlenmesi, C-V ve G/ω-V karakteristikleri üzerindeki etkisini anlamak açısından son derece önemlidir. Özellikle Şekil 5.12 (a)' da 30Å arayüzey kalınlıklı numune için çizilen R_s eğrilerinde görüldüğü gibi düşük frekans eğrileri (~(-1V) ve ~(1V))' da olmak üzere iki ayrı noktada pik vermiştir. Dikkat edilecek olursa diğer iki numune için ise sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' de bu piklerden ~(1V))' da olanlar daha belirgindir. Ayrıca herbir voltaj değerinde artan frekanslarda R_i değerleri azalırken yüksek voltajlarda ya da diğer bir deyişle yığılım bölgesinde frekansa bağlılık giderek azalmıştır. Her üç numune için çizilen eğrilere bakıldığında eğrilerin verdiği piklerin değerleri artan frekansla azalmakta ve pik pozisyonları uygulanan voltajla yeniden düzenlenme ve birleşme nedeniyle pozitif bölgeye doğru kaymıştır (Nicollian ve Brews, 1982).

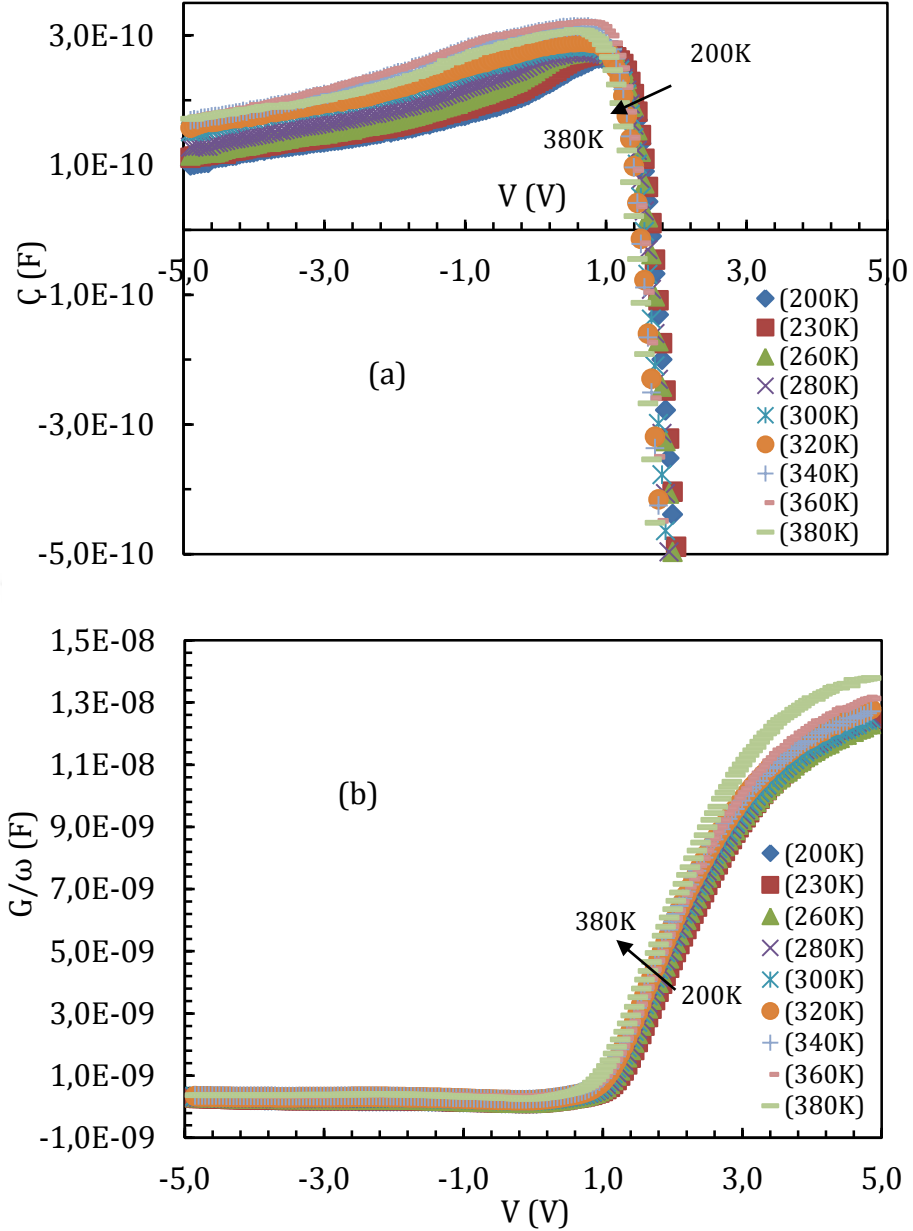
R_s etkisi MS ya da MIS tipi Schottky bariyer diyotlarda özellikle yüksek frekanslar ve yığılım bölgesinde elektriksel parametrelerin gerçek değerlerinde ciddi hatalara neden olabilir. Hesaplamalardaki hataları minimuma indirebilmek için yüksek frekanslarda C ve G/ω değerlerini R_s etkisinden arındıracak bir düzeltme yapılması ihtiyacı doğmuştur. Birçok çalışmada C ve G/ω' nin düzeltme terimlerini içeren belirli bağıntılar yardımıyla düzeltilme eğrileri elde edilmiştir. Bunlardan Yücedağ (2007); Bilkan (2016) ve Özavcı (2014)' nın çalışmaları örnek olarak verilebilir.

C-V ya da G/ω -V eğrilerinde birden fazla pikin görülmesi yük geçişlerinin ara yüzey seviyeleri arasında gerçekleşebildiğinin kanıtı olarak gösterilmiştir. Bu piklerin kaynağı için metal/yarıiletken arayüzeyinde N_{ss} ' lerin iki farklı enerji seviyesinde lokalize olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu durum R_s ' nin özellikle tükenim ve yığılım bölgelerinde çok etkili olduğunu kanıtlamıştır. Bu sebepten frekansa ve voltaja bağlı elektriksel karakterizasyon hesaplamalarında R_s etkisi mutlaka dikkate alınmalıdır (Gökçen vd., 2012b).

Seri direncin kaynağı, kontak tellerine, ohmik ve doğrultucu metal kontaklara, yarıiletkenin gövde direnci, alıcı veya verici katkı atomlarının miktarı ve homojensizliği ile ara yüzey durumlarının varlığına bağlanmıştır. Yalıtkan ara yüzey tabakası ve içindeki oksijen boşlukları gibi safsızlıklar da önemli bir etkindir. Önceden de belirtildiği gibi hem C hem de G değerlerinde, özellikle tükenim bölgesinde ara yüzey durumları oldukça etkin olmuştur. Ara yüzey durumları; yalıtkan/yarıiletken arayüzeyinde bulunan yükler, ara yüzey yakınında bulunan sabit oksit yükleri, dış etkilerin oluşturabileceği oksit tuzaklı yükler, hareketli iyonik yükler, yarıiletkenin periyodik örgüsünde bulunan kusurlar ve laboratuvar koşullarındaki organik kirlilikler gibi çeşitli kaynaklardan meydana gelebilmektedir (Leroy vd., 2005).

5.2.2. Farklı ara yüzey kalınlıklı numuneler için sıcaklığa bağıli karakteristikler

Bu bölümde MIS tipi Schottky bariyer diodun veya kapasitörün bazı elektriksel karakteristikleri, sıcaklık, ara yüzey tabakası ve onun homojenliğı, frekansı, uygulanan gerilim ve elektrik alanı, M/S kontağın bariyer yüksekliğı formülasyonu ve onların seri direncine bağıli olarak incelenmiştir. İlk olarak 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diodun iletim mekanizmasını anlamak için C-V ve G/ω -V karakteristikleri 200-380K sıcaklık aralığı ve 1MHz' de çizilmiş ve sırasıyla Şekil 5.15 (a) ve (b)' de gösterilmiştir. Diğer arayüzey kalınlıklı numuneler için ise bu ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 5.16 (a) ve (b) ile Şekil 5.17 (a) ve (b)' de verilmiştir. Bu grafiklerde C ve G/ω değerlerinin sıcaklık ve voltajın güçlü birer fonksiyonu olduğı gözlenmiştir. Yüzey durumları ve yüzey veya dipol polarizasyonunun varlığı, düşük ve orta düzey frekanslarda yüksek C ve G/ω değerlerinden anlaşılabilir. Ayrıca, bu durumlar taşıyıcı yüklerinin durulma/gevşeme zamanına (τ) bağılıdır (Altındal vd., 2008a, b). Aynı zamanda ($T=1/\omega$) değeri, τ değerinden daha büyük olduğunda yüzey durumlarının her ikisi de ac sinyali kolaylıkla izleyebilmekte ve dipoller alana doğru yönelebilmektedir. Düşük ve orta düzey frekanslarda C ve G/ω değerlerinin artış nedeni de budur. Başka bir deyişle, tuzaklarda bulunan yükler düşük ve orta düzey frekanslarda polarizasyon değerine katkıda bulunabilir. Bununla birlikte bu katkı, yeterince yüksek frekanslarda ($f \geq 1\text{MHz}$) önemsenmeyecek kadar düşüktür (Ho vd., 1988).

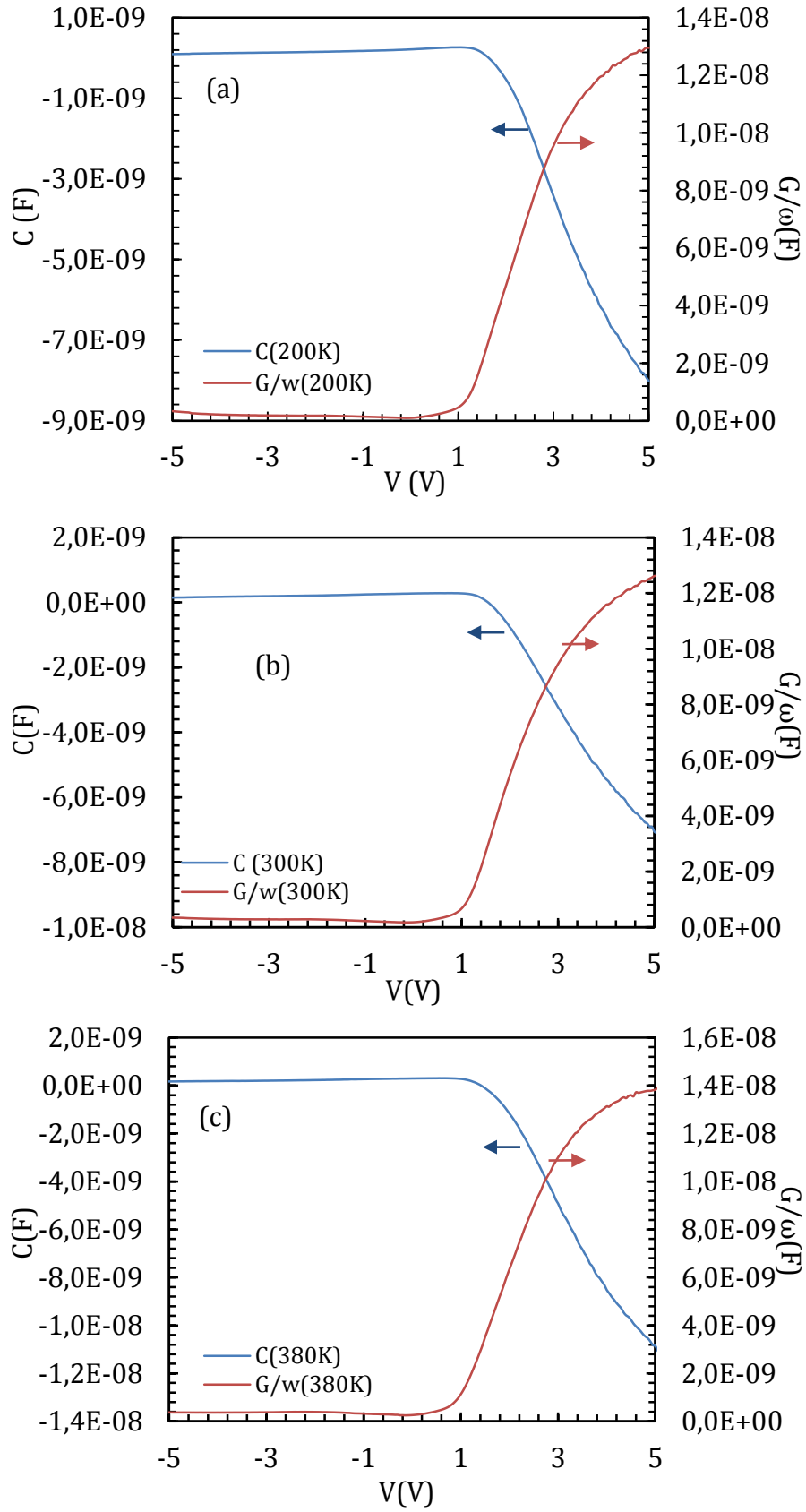


Şekil 5.15. 30Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) C-V, b) G/ω -V karakteristikleri

Şekil 5.15 (a)' da görüldüğü gibi tüm sıcaklıklar için doğru beslem C-V eğrileri anormal pik ve NC değeri göstermiştir. Bu durumların nedeni arayüzey yüklerinin azalması R_s ve iyonizasyon süreçleridir. Şekil 5.15 (a)'da tüketim bölgesinde C değerleri artan gerilimle artmış, daha sonra belirli bir doğru beslem bölgesinde zirve değerine ulaşmıştır. Bu tür davranışlar N_{ss} ve R_s ' nin varlığına atfedilmiştir (Sze, 1981; Rhoderick ve Williams., 1988).

Şekil 5.15 (a)' da görüldüğü gibi diğer sıcaklıklar için çizilen C-V eğrileri de sırasıyla belli bir doğru beslem geriliminden sonra ($\sim 1.5V$) garip bir davranış sergileyerek negatif değerlere doğru gitmiştir. Daha sonra NC değerleri yükselen sıcaklık ile azalmıştır. Şekil 5.16 (a-c)' de gösterildiği gibi, NC' nin bu şekilde azalması, yığılım bölgesindeki hızlı iletkenlik davranışına karşılık gelir. Görüldüğü gibi C değeri her sıcaklıkta anormal pikten sonra azalmaya başlamıştır. C' nin bu davranışı polarizasyon mekanizmasına göre, ölçülen sıcaklığın bir fonksiyonu olarak M/S arayüzeyinde doğal ya da birikmiş ara yüzey tabakasının dielektrik sabitinin azalmasıyla açıklanmıştır. Dahası bu davranış, M/S ara yüzeyindeki tuzaklardan kaçmak için yeterli enerjiye sahip olan yükler tarafından da oluşturulabilir (Vural vd., 2012; Gökçen vd., 2012a).

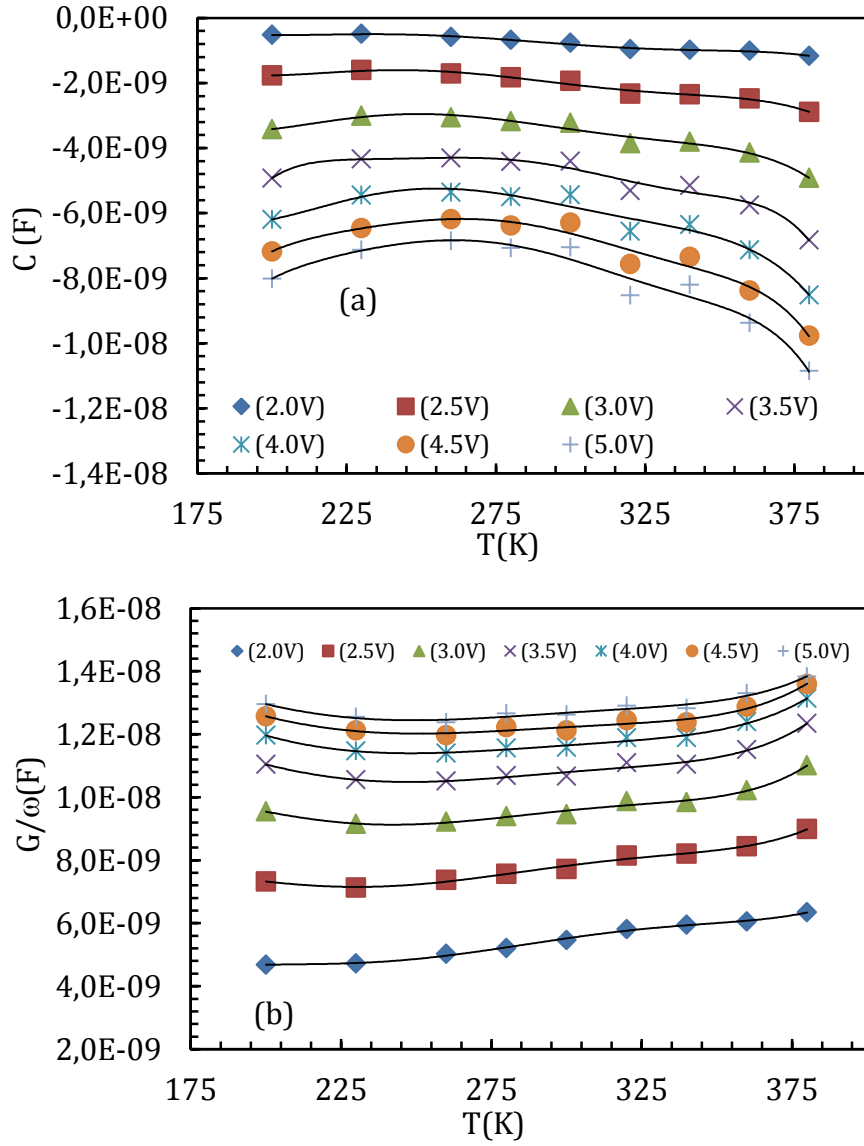
C' nin tersine G değeri aynı yığılım bölgesinde artan voltaj ve yükselen sıcaklıkla aniden artmaktadır. Şekil 5.16 (a-c)'den açıkça görüldüğü gibi her bir sıcaklık için kapasitans değerindeki azalma kondüktans/iletkenlik değerindeki artışa karşılık gelmektedir. Bir başka deyişle C' nin minimum değerleri G' nin maksimum değerleri ile çakışmaktadır. Açıkça görülmektedir ki; M/S arayüzeyinde lokal N_{ss} varlığı bir yük dipolü oluşturmuştur.



Şekil 5.16. $30\text{\AA}$ Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $(\text{Au}/\text{Ti})/\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de sırasıyla (a) 200K, (b) 300K, (c) 380K' de C-V ve G/ω -V karakteristiklerinin karşılaştırılması

Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyoda uygulanan voltajın çoğu yarıiletken ile cihazın seri direnci ve arayüzey dipol ile paylaşılır (Çakar vd., 2004; Güçlü vd., 2016b). Bu nedenle kutuplaşma arttıkça ve yapıya daha fazla taşıyıcı katıldıkça kapasitans değerinin düştüğüne inanılmaktadır.

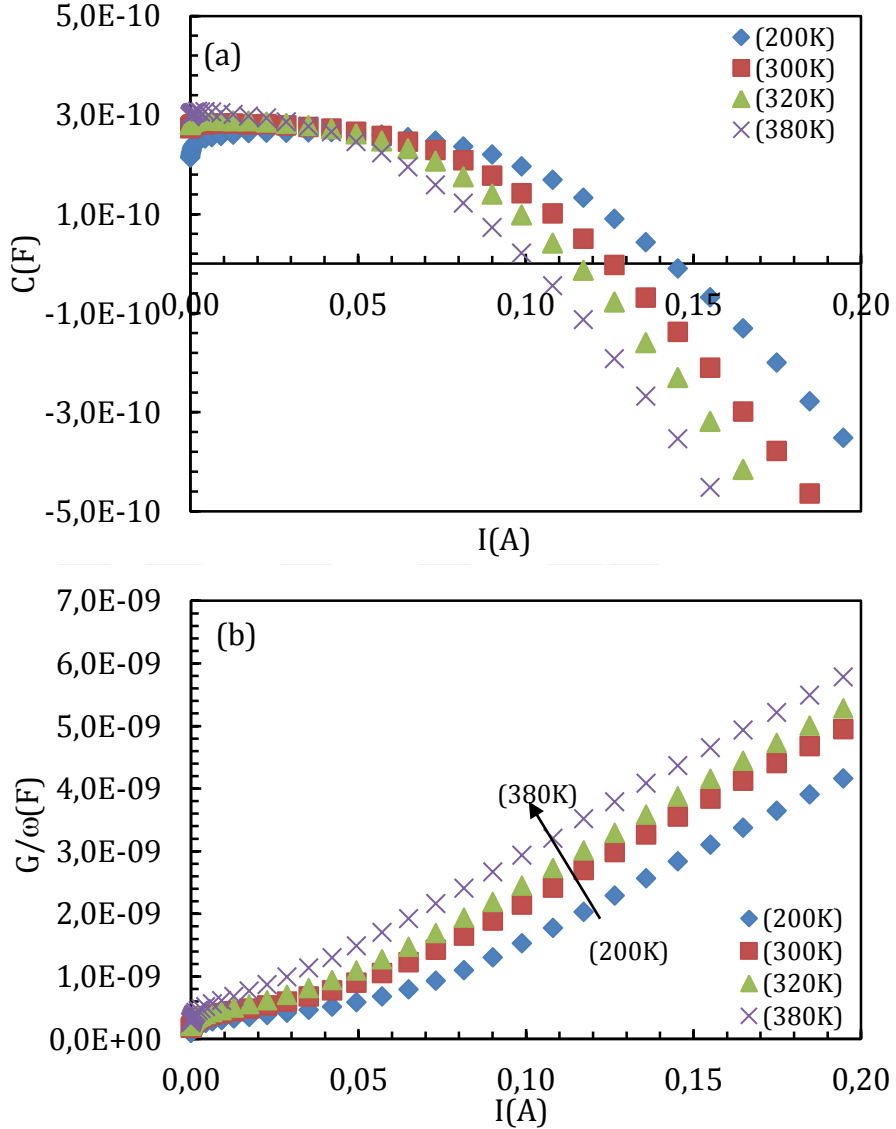
Şekil 5.15 (a-b), Şekil 5.16 (a-c)' de negatif kapasitans davranışı açıkça görülmektedir. Bu davranış, uygulanan voltaj artışının elektrotlardaki yükü azaltmaya yol açması nedeniyle dikkat çekicidir. (Jones vd., 1988). Görünüşte negatif kapasitansın fiziksel mekanizmaları farklı elektronik cihazlarda çeşitlilik göstermiştir. Genellikle NC davranışı kontak enjeksiyonu (Ershov vd., 1998), N_{ss} (Wu vd., 1990) ve azınlık taşıyıcı enjeksiyonu etkileri (Champness ve Clark, 1990) ve R_s (Bilkan vd., 2015) ile ilişkilidir. Şekil 5.16 (a-c)' de görüldüğü gibi NC değerleri her sıcaklıkta meydana gelir ve diyot iletkenliğinin maksimum değerine uygundur. Ayrıca Şekil 5.17 (a) ve (b)' de de sırasıyla görüldüğü gibi C-V-T ve G/ω -V-T karakteristikleri malzemenin indüktif davranış sergilediğini göstermesi açısından önemlidir (Gharbi vd., 2006; M'Peko, 1997).



Şekil 5.17. 30Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli doğru beslem voltajlarında sıcaklığa bağlı (a) C ve (b) G/ω değerleri

Uygulanan voltaja bağlılığı anlamak için C-T ve G/ω-T ölçümleri 0.5V adımlarla Şekil 5.17 (a) ve (b)'de 30Å ara yüzey kalınlıklı numune için sırasıyla tükenim ve yığılma bölgelerinde gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi C değerleri artan uygulama gerilimi ile düşerken G/ω değerleri artış göstermiştir. G/ω' daki bu değişim, ara yüzey durumlarının durulma/gevşeme süresine bağlı olarak sıcaklık etkisiyle yük sayılarındaki artışa atfedilmiştir (Arslan vd., 2010; Vural vd., 2012; Korucu vd., 2013b). C-T ve G/ω-T grafikleri özellikle düşük sıcaklıklarda önem kazanır. Bu tür davranışlar yüzey ve ara yüzey tuzaklarında taşıyıcıların yeniden yapılanması ve düzenlenmesi sebebiyle mümkün olur. Öte

yandan tuzak yüklerinin yüksek sıcaklıklarda Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs yapının band boşluğunda metal ile yarıiletken arayüzeyinde yer alan tuzakları boşaltmak için yeterli enerjiye sahip olduğuna da dikkat edilmelidir.

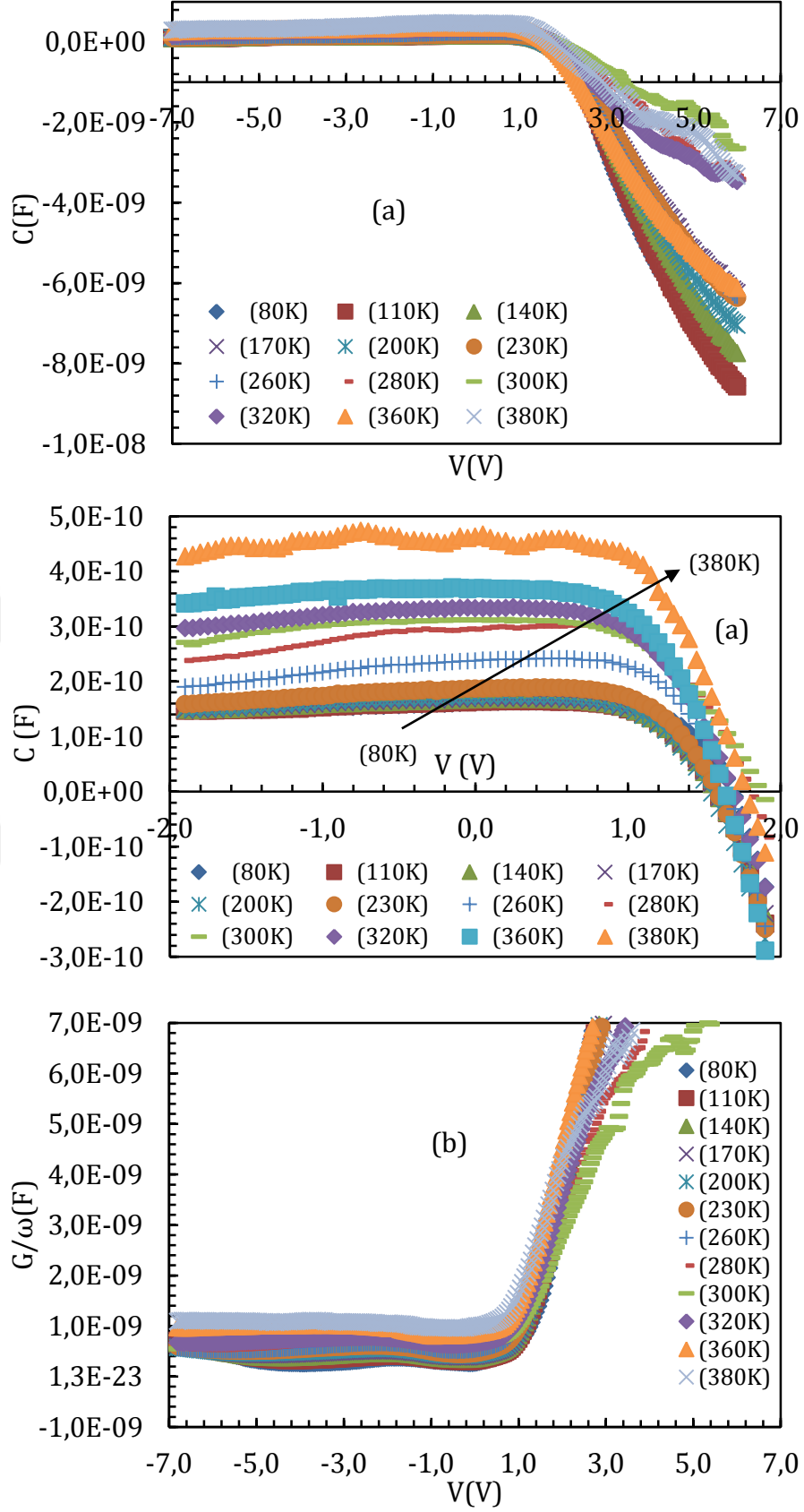


Şekil 5.18. 30Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) C-I b) G/ω -I karakteristikleri

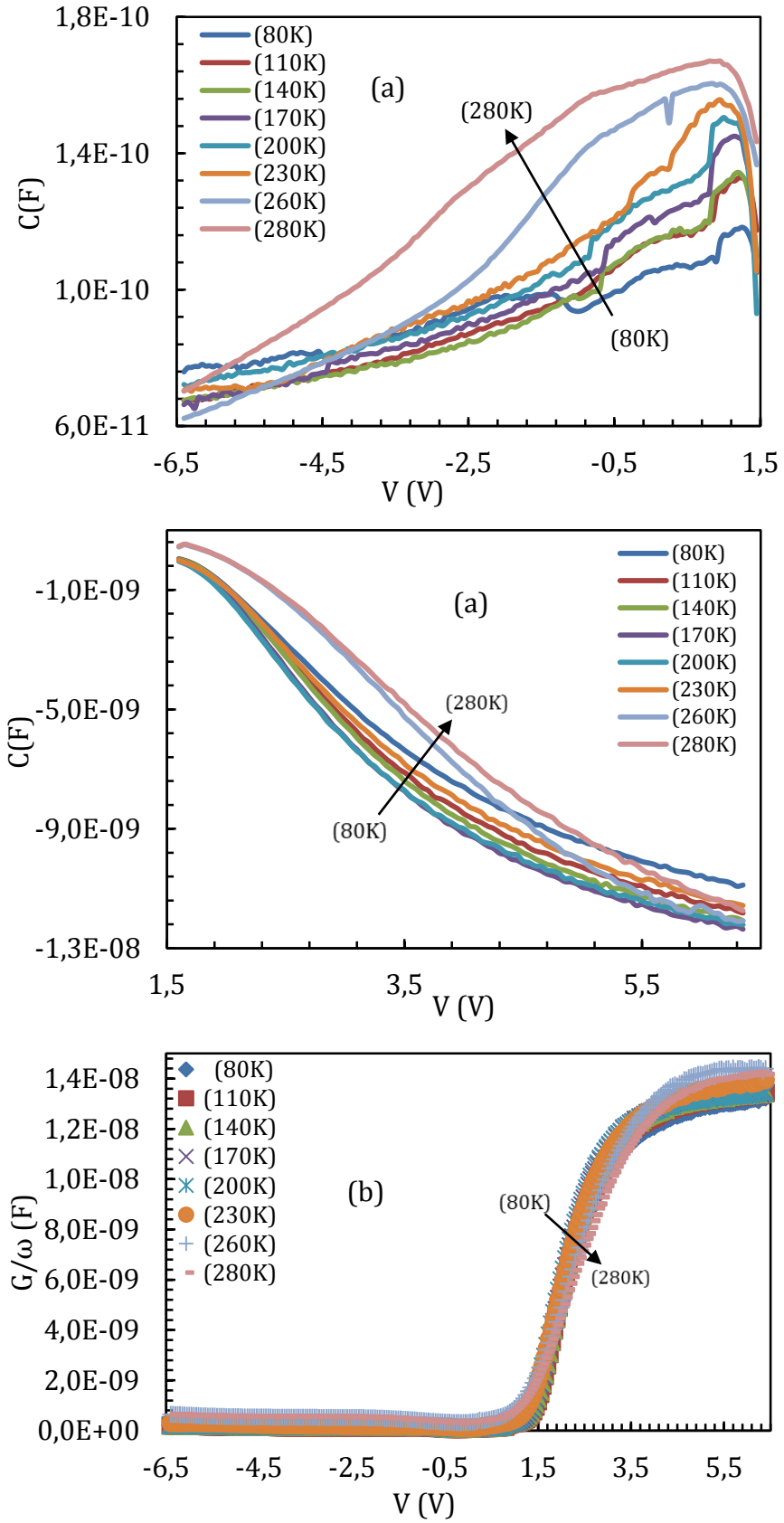
Negatif kapasitansa karşılık gelen kondüktans değerlerini daha iyi gözlemlemek için benzer voltaj ve akımlarda ama farklı sıcaklıklarda C-I ve G/ω -I grafiklerinden faydalanılmıştır. Bu grafikler sırasıyla Şekil 5.18 (a) ve (b)' de gösterilmiştir. Şekil 5.18 (a)' da her bir sıcaklık için kritik bir voltaj değerinde (V_c) ve sonrasında negatif yönde bir C davranışı gözlenmiştir. Şekil 5.18 (a)' da görüldüğü gibi NC, yüksek sıcaklıklarda bu bölgedeki düşük R_s değerine ait

olabilir. Azınlık taşıyıcılarının enjekte edilmesinin nedeni olarak düşünülen empedansa bir indüktif katkı sağlayan doğru beslem bölgesinde yarıiletken içinde yüksek değerler almaktadır (M' Peko, 1997).

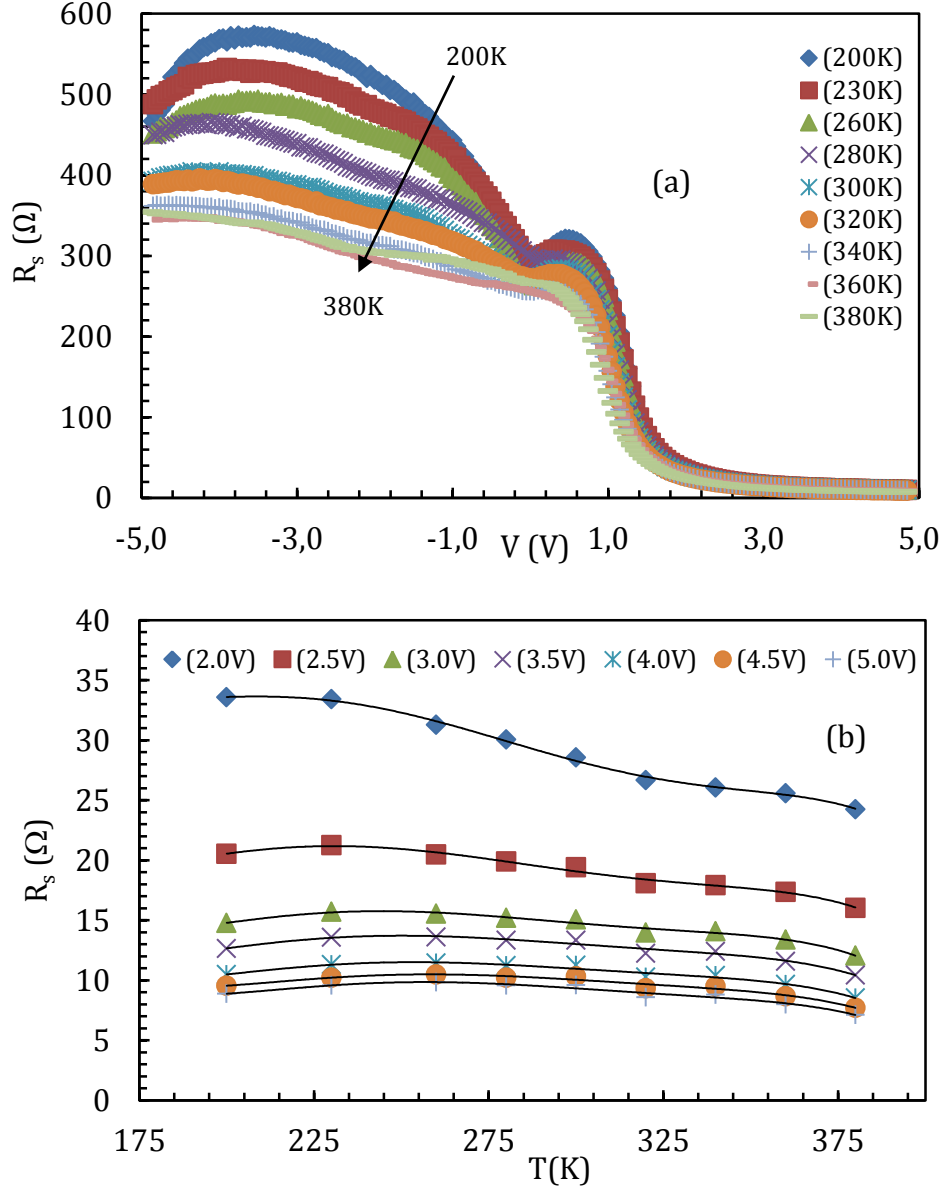
Şekil 5.19 ve Şekil 5.20' de sırasıyla 50Å ile 100Å ara yüzey kalınlıklı numunelerin (a) C-V, (b) G/ω-V karakteristikleri 1MHz' de çeşitli sıcaklık aralıklarında çizilmiştir. Şekil 5.19 ve Şekil 5.20' de açıkça görüldüğü gibi 100Å ara yüzey kalınlıklı numune için grafikler (~1,5V) civarında ve sonrasındaki ileri doğru beslem bölgesinde negatif kapasitans özelliği gösterdiği için iki ayrı voltaj bölgesine ayrılarak çizilmiş, ayrıca oda sıcaklığının üzerindeki karakteristikler beklenen sonuçları vermediği için bu numunenin sıcaklık aralığı (80K-280K) olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.19. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) C-V (sırasıyla (± 7) ve (± 2) voltaj aralıkları için ayrı ayrı çizilmiştir.), b) G/ω -V karakteristikleri



Şekil 5.20. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $Au/Ti/Al_2O_3/n-GaAs$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) C-V (iki beslem bölgesine ayrılarak gösterilmiştir.) b) G/ω -V karakteristikleri

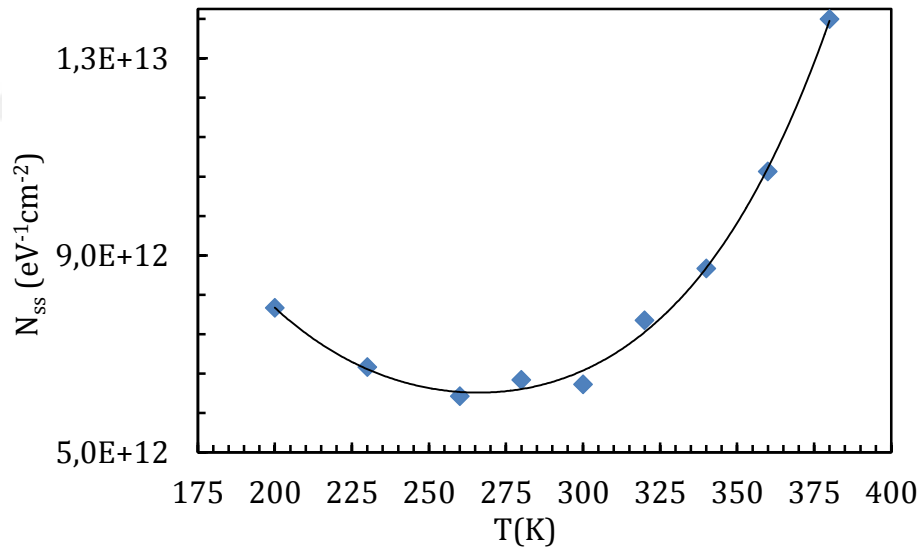


Şekil 5.21. 30Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) R_s -V ve b) 0.5V adımlarla çeşitli doğru beslem voltajlarında R_s -T karakteristikleri

Arayüzey tabakası olan ve olmayan MS tipi Schottky bariyer diyotların R_s ' lerini elde etmek için literatürde çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Nicollian ve Brews, 1982; Norde, 1979; Cheung ve Cheung, 1986). Bunlardan Cheung ve Cheung (1986) ve Norde (1979) tarafından doğru beslem I-V karakteristikleri ile ilgili olan yöntemler önerilmiştir. Nicollian ve Brews (1982) tarafından ise doğru beslem C-V ve G/ω -V ölçümlerine dayanan başka önemli yöntem de mevcuttur. Bu çalışmada Nicollian ve Brews (1982) tarafından önerilen yöntem kullanılmıştır.

MIS veya MOS tipi yapılar için R_s ' nin gerçek değeri, yüksek frekansta ($\approx 1\text{MHz}$) güçlü yığılım bölgesinde ölçülen kapasitans (C_m) ve kondüktans (G_m) (Nicollian ve Brews, 1982; Tataroğlu vd., 2005) değerleri ile hesaplanmıştır. R_s ' nin gerilim ve sıcaklık bağımlılığı uygulanan tüm doğru beslem voltajları için (C_m) ve (G_m) değerlerinden hesaplanıp değerlendirilebilir (Nicollian ve Brews, 1982; Kanbur vd., 2005).

Bu çalışmada $30\text{\AA}$ ara yüzey kalınlıklı numune için Şekil 5.15 (a) ve (b) de görülen sırasıyla (C_m) ve (G_m) değerleri ile Eşitlik (5.9) kullanılarak oda sıcaklığında frekansa bağlı seri direnç değerleri hesaplanmış, Şekil 5.21 (a) ve (b)' de de sırasıyla voltaja ve sıcaklığa bağlı olarak gösterilmiştir. Şekil 5.21 (a) ve (b)' de R_s değerleri genellikle tüm beslem voltajları için artan sıcaklıkla azalmıştır. Bununla birlikte, yeterince yüksek beslem voltajlarında veya yığılım bölgesinde ise sıcaklığa bağlı olarak düşmüştür.



Şekil 5.22. $30\text{\AA}$ Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1MHz ' de N_{ss} ara yüzey durum yoğunluğunun sıcaklığa bağlı dağılımı

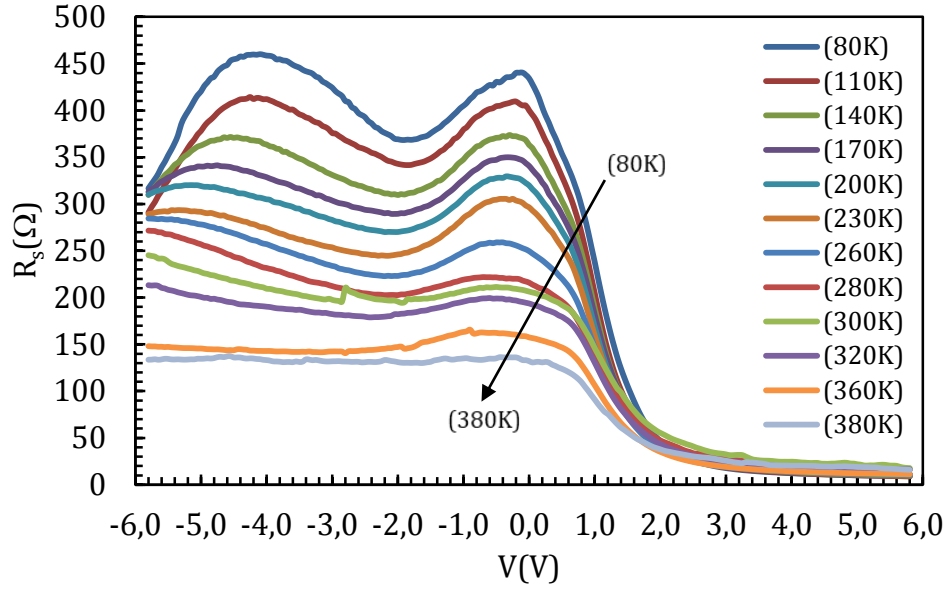
N_{ss} ' yi belirlemenin yollarından biri olan sıcaklık bağımlılığı, Hill-Coleman yöntemi (1980) kullanılarak elde edilmiştir. Bu şekilde N_{ss} değeri, C_m ' nin tepe değerinden hesaplanmış ve aşağıdaki gibi her bir sıcaklık için onun $(G/\omega)_m$ değerlerine karşılık gelecek şekilde aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G/\omega)_m}{((G/\omega)_m/C_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2} \quad (5.10)$$

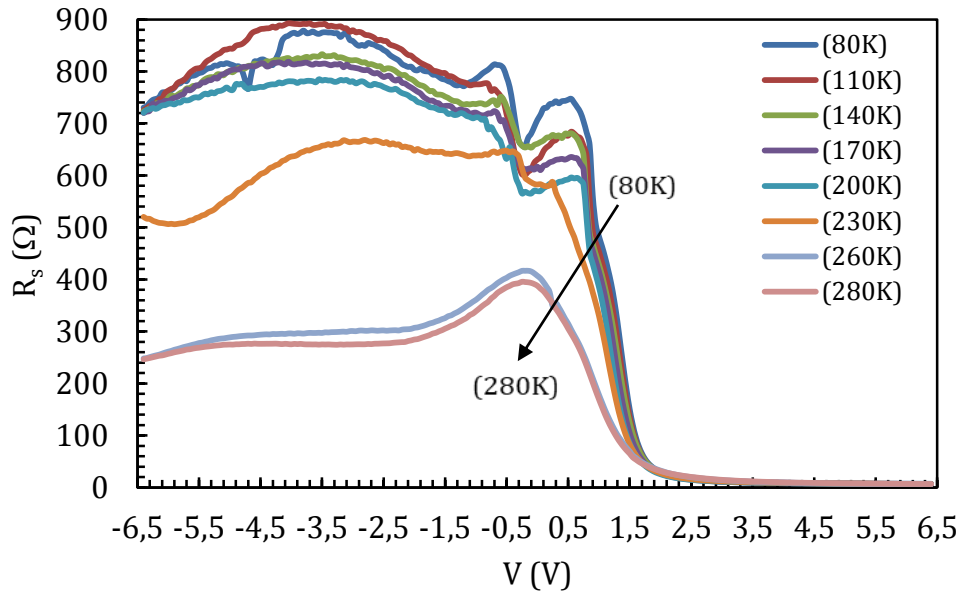
Burada A, doğrultucu kontak ya da diyot alanı, ω açısal frekans ($2\pi f = 2\pi/T$), C_m ve $(G/\omega)_m$ ölçülen kapasitans ve kondüktans olarak C' nin maksimum değeri ve o değere karşılık gelen iletkenliği ifade etmektedir. Ayrıca C_{ox} , ara yüzey tabakası kapasitansıdır. Böylece 30Å ara yüzey kalınlıklı numune için N_{ss} değeri Eşitlik (5.10) kullanılarak tüm sıcaklıklar için Şekil 5.22' de verilmiştir. Bu numune için C_{ox} değeri, oda sıcaklığında kuvvetli yığılma bölgesinde aşağıda verilen Eşitlik (5.11) kullanılarak ve C-V ve G/ω-V ölçümlerinden faydalanılarak 8.21×10^{-9} F olarak elde edilmiştir (Nicollian ve Brews, 1982).

$$C_{ox} = C_m \left[1 + \left(\frac{G_m}{\omega C_m} \right)^2 \right] \quad (5.11)$$

Şekil 5.22' de görüldüğü gibi, N_{ss} ve T grafiği, sıcaklık etkisinden dolayı yüzey durumlarındaki yüklerin yeniden yapılandırılması ve düzenlenmesine bağlı olarak 'U' şeklinde bir davranış sergilemiştir. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS yapısı için N_{ss} değerleri (200-275K) sıcaklık aralığında artan sıcaklık ile azalırken, (275-380K) sıcaklık aralığındaki artan sıcaklıkla ortalama bir artış sergilemiştir (Altındal ve Uslu, 2011, Dökme vd., 2010, Akkal vd., 1998). Burada belirtildiği gibi bu yüzey/arayüzey durumları ile hacim durumları; sıcaklık, uygulanan voltaj ve dış alternatif alan etkileri altında elektronik yükler stoklayabilir (Sze, 1981; Nicollian ve Brews, 1982; Nicollian ve Goetzberger, 1967; Rhoderick ve Williams, 1988). Ayrıca, taşıyıcı enjeksiyonunun lokalize yüzey durumlarına atlama (hopping) mekanizması ile ilgisi olduğundan enjeksiyonun fiziksel mekanizmasının ayrıntıları şimdiye kadar çok net anlaşılamamıştır. Sonuç olarak voltaj ve frekans bağımlılıklarına, yüzey durumları seviyesinin varlığı, yüksek seri direnç, M/S arayüzeyinde doğal bariyer oluşumunun varlığı, polarizasyon ve atlama (hopping) mekanizmalarının neden olduğu söylenebilir.



Şekil 5.23. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda R_s -V karakteristikleri



Şekil 5.24. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda R_s -V karakteristikleri

Farklı ara yüzey kalınlıklı R_s -V grafikleri yığılım ve tükenim bölgelerini temsil eden bölgelerde çift pik davranışı sergilemiştir (Şekil 5.21, Şekil 5.23, Şekil 5.24). Bu iki davranışın zirve değerleri artan sıcaklıkla azalmıştır. Ayrıca, taşıyıcıların konumları onların uygulanan gerilim altında yeniden yapılandırılması ve yeniden düzenlenmesi nedeniyle pozitif beslem bölgesi yönünde değişmiştir. Biz burada tuzak yüklerinin $n\text{-GaAs}$ bant aralığında, M/S arayüzeyinde yerleşik tuzaklardan kurtulması için yeterli enerjiye sahip

olduğuna inanıyoruz. Bu durumda R_s , Schottky bariyer diyotların ideal olmayan davranışına neden olan en önemli parametre olarak gözükmemektedir (Tunç vd., 2011a ,b; Vural vd., 2012; Dökme vd., 2010). Şekil 5.21 (b)' de görüldüğü gibi R_s değeri herbir gerilim voltajı için sıcaklığa bağlıdır. R_s , artan gerilimle azaldığı görülmüştür. Ayrıca C' nin, G/ω' nin ve R_s' nin bu tür davranışları Al_2O_3 ile n -GaAs arasındaki N_{ss} 'nin belirtilen yoğunluk dağılımına ve termal yeniden yapılandırma ve yeniden düzenlenme durumuna atfedilmiştir (Bengi vd., 2008).

5.3. Dielektrik Özellikler

Bu çalışmada dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp tanjant ($\tan\delta$) ve elektrik modülüsün gerçek (M') ve sanal kısımları (M'') farklı ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 / n -GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotların elektriksel iletkenlikleri (σ_{ac}) gibi dielektrik özellikleri, (1kHz-1MHz) geniş frekans aralığında 50mV' luk genlikle dc sinyal üzerine ac sinyal bindirilerek ($\pm 4V$) voltaj aralığında C-V ve G/ω -V ölçümlerini içeren dielektrik spektroskopisi (Colinge, ve Colinge, 2002; Dimitrijević, 2012; Kaya vd., 2016; Tanrikulu vd., 2015; Yücedağ, vd., 2014; Macedo vd., 1972) ile incelenmiştir.

5.3.1. Farklı ara yüzey kalınlıklı numuneler için frekansa bağlı dielektrik özellikler

MIS yapısının dielektrik özellikleri, elektronik cihaz uygulamalarında önemli rol oynamaktadır. Bu nedenle ac elektrik iletkenliği ve elektrik modülüs gibi dielektrik parametrelerin detaylı incelenmesi cihaz özelliklerinin belirlenmesinde çok önemlidir. Farklı ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 / n -GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyot yapısının karmaşık dielektrik sabitinin (ϵ^*) gerçek ve sanal kısımları ile kayıp tanjantı (1kHz-1MHz) frekans ve ($\pm 4V$) voltaj aralığında, oda sıcaklığında incelenmiştir.

Bir yapının elektrik ve dielektrik özelliklerinin ortaya çıkarılmasında önemli bir parametre olan kompleks geçirgenlik (Symth, 1955; Popescu ve Bunget, 1984);

$$\epsilon^* = \epsilon' - i\epsilon'' \quad (5.12)$$

ile verilmektedir. Burada i hayali kök olarak $\sqrt{-1}$ e eşittir. Böylelikle admittans ölçümleri şu şekilde ifade edilir;

$$\varepsilon^* = \frac{Y^*}{i\omega C_0} = \frac{C_{ma}}{C_0} - i \frac{G_{ma}}{\omega C_0} \quad (5.13)$$

Burada Y^* , C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla ölçülen admittans, kapasitans ve kondüktans değerleridir. ω açısal frekanstır.

Aşağıdaki ifade kullanılarak farklı frekanslar için güçlü yığılm/birikim bölgesinde ölçülen kapasitans (C_{ma}) değeri kullanılarak dielektrik sabiti (ε') hesaplanabilir (Chelkowski, 1980; Tataroğlu vd., 2006).

$$\varepsilon' = \frac{C_{ma}}{C_0} = \frac{C_{ma}d_{ox}}{\varepsilon_0 A} \quad (5.14)$$

Burada $C_0 = \varepsilon_0 A/d_{ox}$ boş kapasitörün kapasitansıdır. A doğrultucu kontak alanı olup bu çalışmada 0.01 cm^2 dir. ε_0 boş uzayın/serbest alanın elektrisel geçirgenliğidir. Değeri, $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-14} \text{ Fcm}^{-1}$ dir.

Güçlü yığılm bölgesinde yapının maksimum kapasitansı ara yüzey oksit kapasitansına karşılık gelir ($C_{ma} = C_i = \frac{\varepsilon' \varepsilon_0 A}{d_{ox}}$).

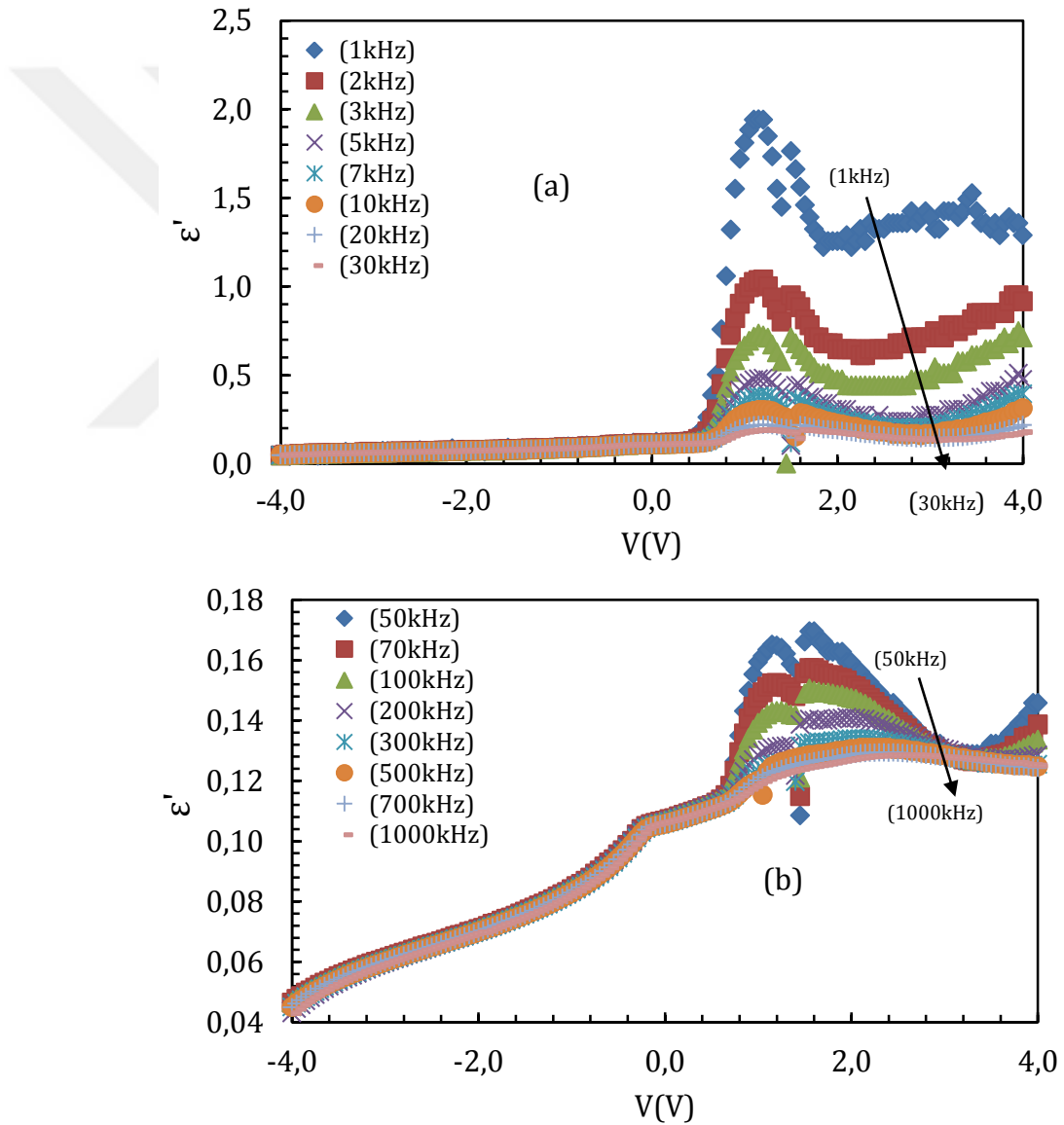
Dielektrik kayıp ise (ε'') aşağıdaki denklem kullanarak güçlü yığılm bölgesinde farklı frekanslarda ölçülen iletkenlik (G_{ma}) değerlerinden hesaplanmıştır;

$$\varepsilon'' = \frac{G_{ma}}{\omega C_0} = \frac{G_{ma}d_{ox}}{\varepsilon_0 \omega A} \quad (5.15)$$

Kayıp tanjantın tanımı ise;

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (5.16)$$

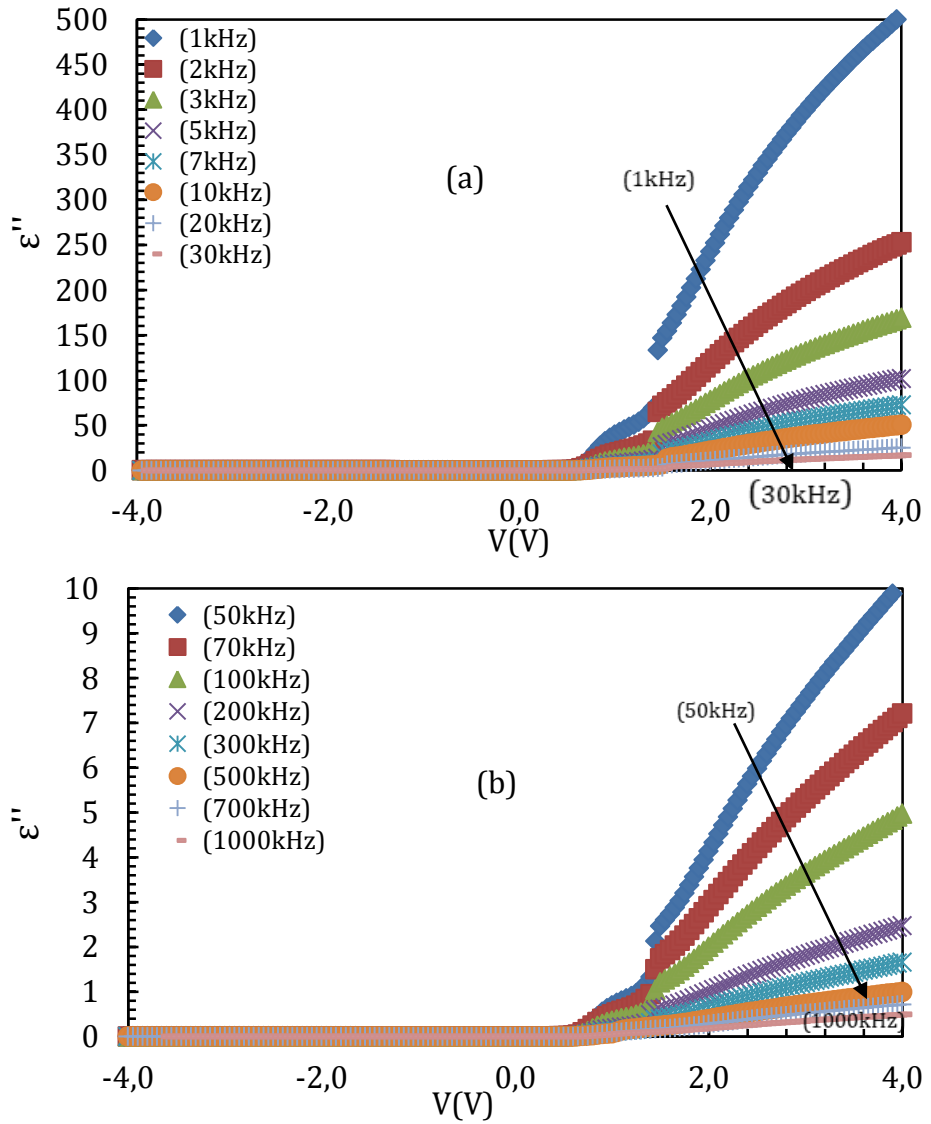
şeklinde verilmiştir (Symth, 1955; Tataroğlu vd., 2006). Uygulanan gerilimin fonksiyonları olarak ε' , ε'' ve $\tan\delta$ profillerinin frekans bağımlılıkları sırasıyla Eşitlik (5.14), (5.15) ve (5.16)' da ve 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı numunenin oda sıcaklığında voltaja bağlı karakteristikleri ise sırasıyla Şekil (5.25), (5.26) ve (5.27)' de verilmiştir. Şekil 5.25 (a) ve (b)' de görüldüğü gibi ε' değeri hem tükenim hem de yığılma bölgeleri için her bir frekans değerinde artan uygulama voltajı ile artarken, seri dirençten dolayı (1V) ile (1.5V) uygulama voltajları arasındaki yığılma bölgesinde bükülmeye başlamıştır.



Şekil 5.25. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 / n -GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki ε' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için

Şekil 5.26 (a) ve (b)' de açıkça görüldüğü gibi ε'' değeri ε' ile karşılaştırıldığında zıt bir davranış sergilemiştir. Yani ε' değerinin uygulanan voltaj ile güçlü yığılım bölgesinde azaldığı durumda C ile G/ω arasındaki benzer ilişkide olduğu gibi (Şekil 5.9 (a) ve (b)) ε'' değeri artmıştır.

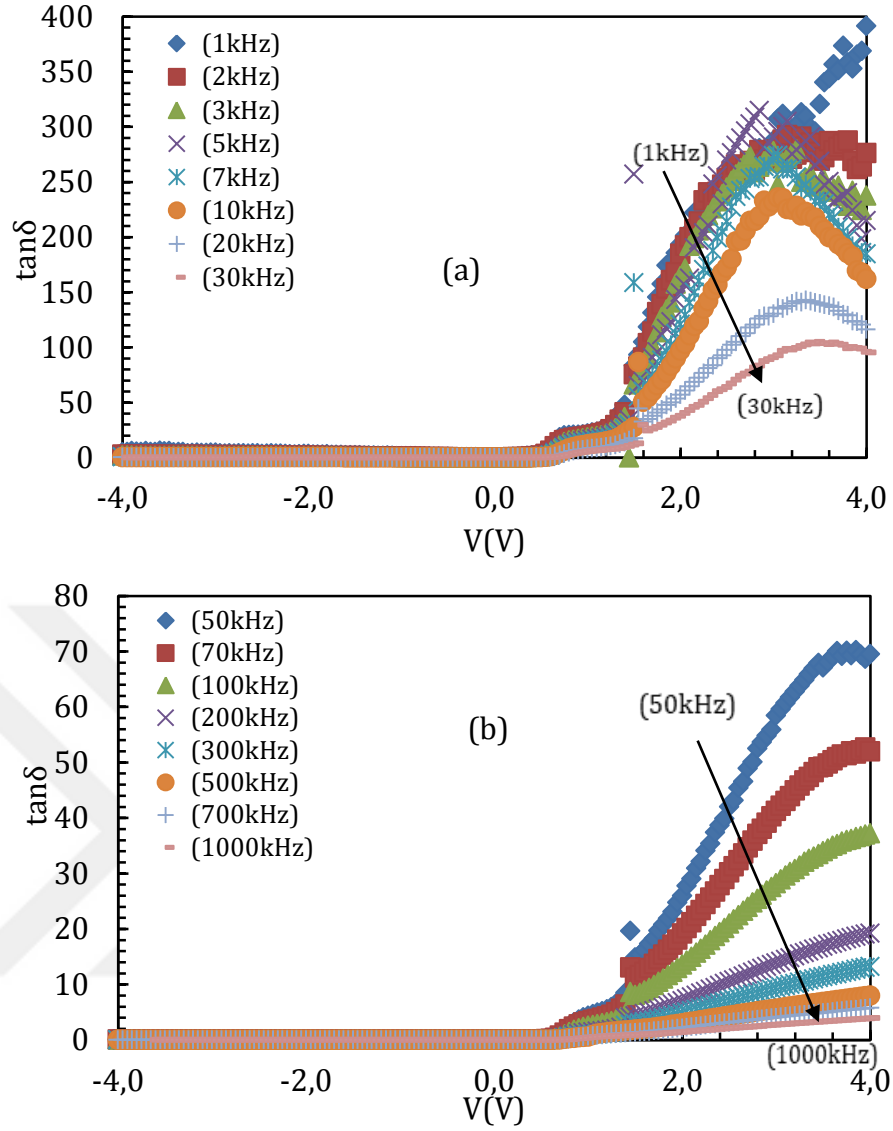
Şekil 5.25 (a) ve (b)' de ise ε' değeri tersinim bölgesinde her frekansta aynı değeri vermiştir. Bu tür C ve G/ω veya ε' ve ε'' davranışları R_s ve N_{ss} etkisiyle indüktif davranış karakteriyle açıklanmıştır (Sattar ve Rahman, 2003; Fanggao vd., 1996).



Şekil 5.26. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki ε'' - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için

Şekil 5.27 (a) ve (b)' de görüldüğü gibi $\tan\delta$ -V grafiği ise herbir frekans değerinde ε'' -V grafiğinde olduğu gibi yapının indüktif davranışı nedeniyle benzer karakter sergilemiştir. Bu tür davranışlar; numune hacmi, arayüzey oksit tabaka, arayüzey tuzakları, yüzey polarizasyonu ve yüzey etkilerine atfedilmiştir (Kaya vd., 2016; Tanrıkulu vd., 2015; Yücedağ vd., 2014; Macedo vd., 1972; Sze, 1981). $\tan\delta$ -V grafiği özellikle düşük frekanslarda daha da belirgin olarak izlenebilen ε' ve ε'' değerlerine bağlı olarak hem tükenim hem de yığılma bölgesinde pik davranışı sergilemiştir. Ayrıca Şekil (5.25) ve Şekil (5.26)' da görüldüğü gibi ε' ve ε'' değerleri frekans arttıkça azalmaktadır. ε' ve ε'' değerlerinin düşük frekanslarda daha yüksek değer alışı muhtemel ara yüzey polarizasyon mekanizmasının varlığına atfedilmiştir. Çünkü ara yüzey durumları yüksek frekanslarda ac sinyalini takip edemez ve arayüzey polarizasyon mekanizmasının eksikliği nedeniyle kapasitansa katkıda bulunamaz (Tataroğlu vd., 2006).

Genel olarak düşük frekanslardaki polarizasyon mekanizmaları elektronik, iyonik, dipolar ve arayüzey yük polarizasyon dağılımından etkilenir (Barış, 2014; Le-Huu vd., 2011). Düşük frekanslarda incelenen ε' ve ε'' nün yüksek değerleri, arayüzey Maxwell-Wagner polarizasyonu (Alialy vd., 2014) ve alan yük polarizasyonu (Vural vd., 2012) ile ilişkilendirilmiştir.



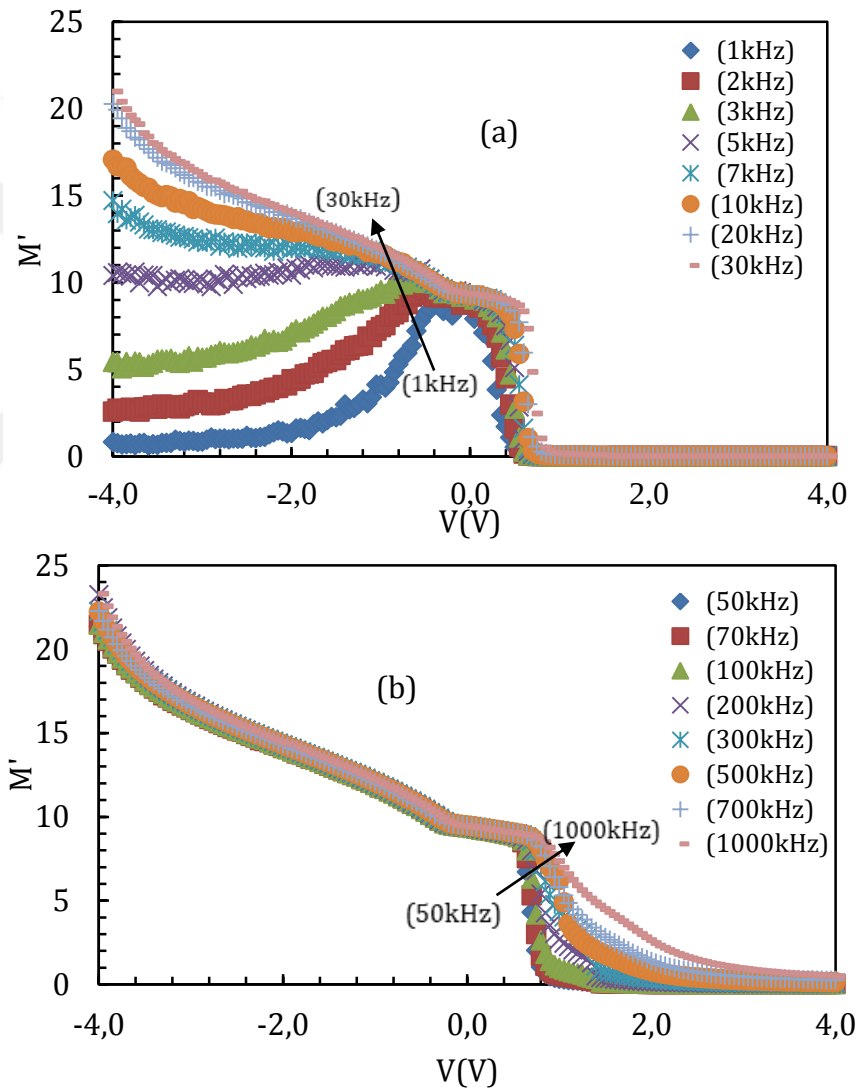
Şekil 5.27. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki $\tan \delta$ - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için

Dielektrik ya da yalıtkan materyaller bakımından kompleks elektrik modülüsün biçimi (M^*) üzerine farklı çalışmalar literatürde mevcuttur (Vural vd., 2012; Yıldız vd., 2010). Kompleks empedans (Z^*) veya kompleks dielektrik sabiti ($\epsilon^* = 1/M^*$) verileri ile M^* biçimine dönüşüm aşağıdaki ilişki kurularak gerçekleştirilebilir (Chelkowski, 1980; Popescu ve Bunget; 1984; Symth, 1955);

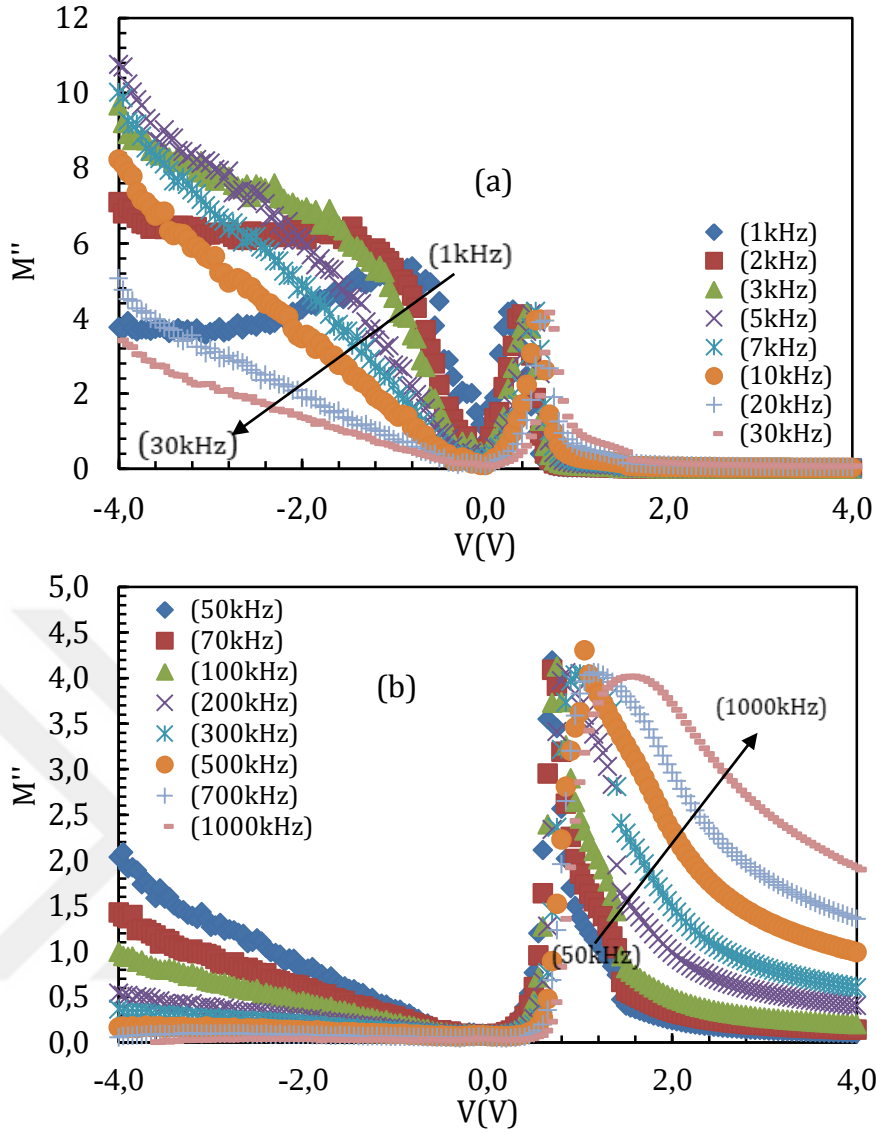
$$M^* = i\omega C_0 Z^* \quad (5.17a)$$

$$M^* = \frac{1}{\epsilon^*} = M' + iM'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} + i \frac{\epsilon''}{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} \quad (5.17b)$$

Burada Eşitlik (5.17a) kompleks dielektrik modülünün kapalı formunu, Eşitlik (5.17b) ise açık formunu ifade etmektedir. $i = \sqrt{-1}$ hayali/sanal kök, ω açısal frekanstır. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun kompleks elektrik modülüs (M^*)' ün gerçekte ve sanal kısımlarının voltaj ve frekans bağılılıkları (M' , M''), ϵ' ve ϵ'' değerleri kullanılarak oda sıcaklığında belirlenen frekanslar için sırasıyla; Şekil 5.28 (a) ve (b) ve Şekil 5.29 (a) ve (b) 'de 30Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyet için verilmiştir.



Şekil 5.28. 30Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki M' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



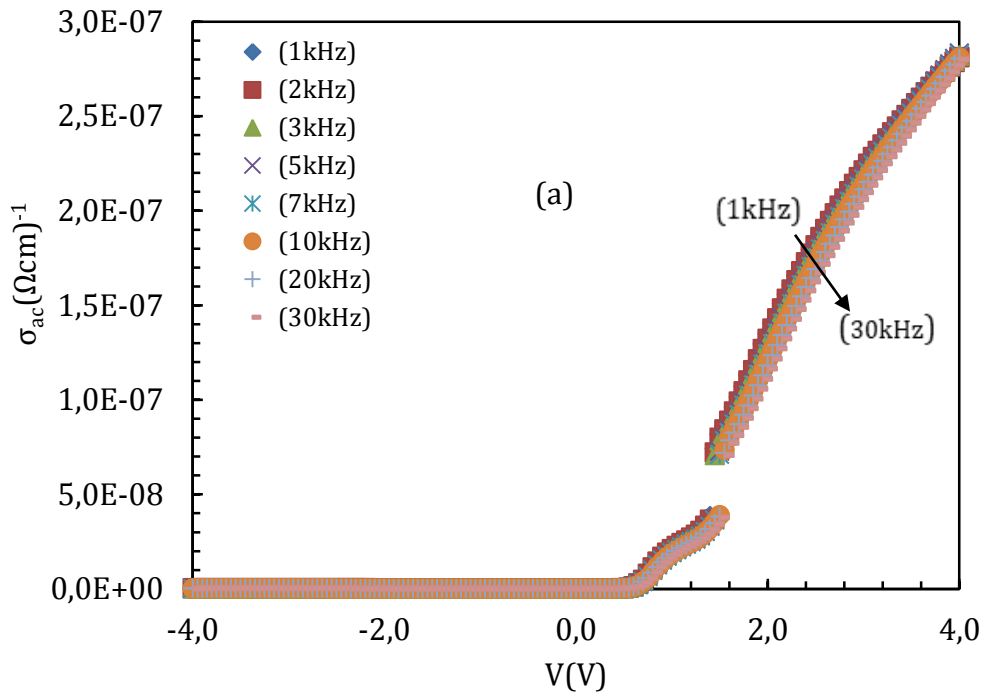
Şekil 5.29. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $Au/Ti/Al_2O_3/n$ -GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki M'' - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için

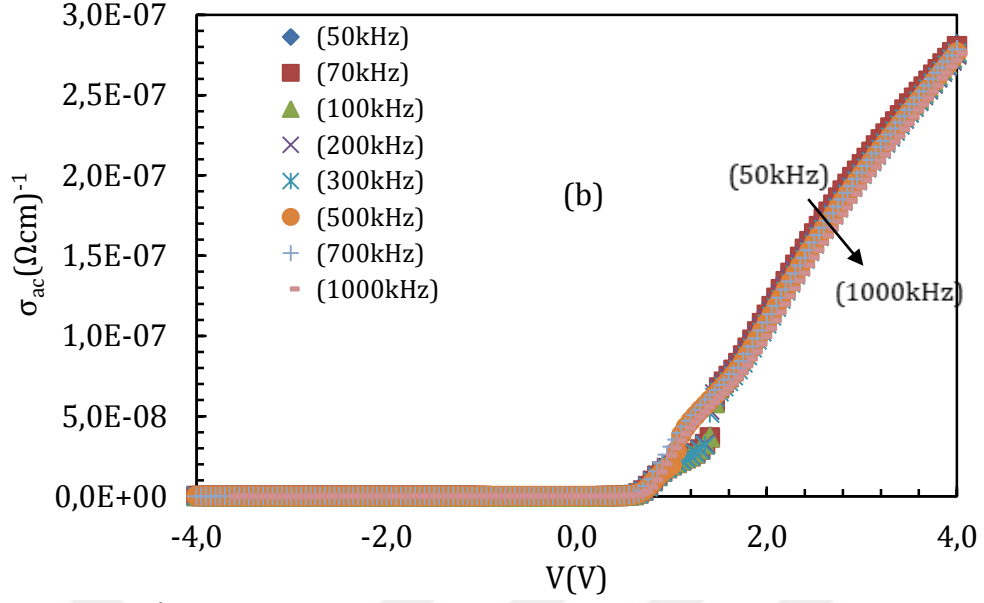
Şekillerden de açıkça görüldüğü gibi (M' , M'') değerlerinin özellikle tersinim ve yığılım bölgelerinde belirli bir frekans ve voltaj dağılımına sahip olduğu açıktır. Burada sırasıyla Şekil 5.28 (a) ve (b) ve Şekil 5.29 (a) ve (b) 'de, M' - V ve M'' - V karakteristikleri Eşitlik (5.17a) ve Eşitlik (5.17b) kullanılarak farklı frekanslar için elde edilmiştir. Şekillerden M' , M'' değerlerinin özellikle tükenim bölgesinde, uygulanan gerilimin kuvvetli birer fonksiyonu olduğu görülmektedir. Arayüzey tuzak yüklerinin katkısı nedeniyle de azalan frekansla tersinim bölgesinde artan bir pik daha vermiştir. M' - V ve M'' - V eğrilerindeki bu tarz davranışlar uygulanan gerilimden ziyade frekansa duyarlı dielektrik

durulma mekanizması ile açıklanmıştır. Tersinim ve tükenim bölgesindeki bu tarz pik davranışlarının $\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ arayüzeyinde bulunan ara yüzey tuzak yükü yoğunluğu dağılımına ve durulma/gevşeme zamanlarına bağlı olduğu düşünülmektedir (Daniel, 1967; Barış, 2014).

Diğer yandan M' değeri minimuma ulaştığında M'' değeri maksimuma ulaşmaktadır. Yani bu durum MIS yapısının indüktif davranışı ile durulma/gevşeme işlemi nedeniyle ($M_\infty = 1/\varepsilon_\infty$) değerine karşılık gelir.

Kompleks dielektrik geçirgenlik sabitindeki ($\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''$), ε' ve ε'' sırasıyla gerçel ve sanal kısımlar olup ε' değeri elektrik alan altındaki depolanan enerjiyi, ε'' ise enerji emilimi ve azalımını belirlemek için kullanılmıştır. Diğer taraftan kompleks dielektrik geçirgenlik sabiti ($\varepsilon^* = 1/M^*$) verisi kullanılarak bulunan kompleks elektrik modülüs ($M^* = M' + jM''$) ifadesi ise MIS yapının polarizasyon etkilerini belirlemede oldukça önemli bir parametredir.





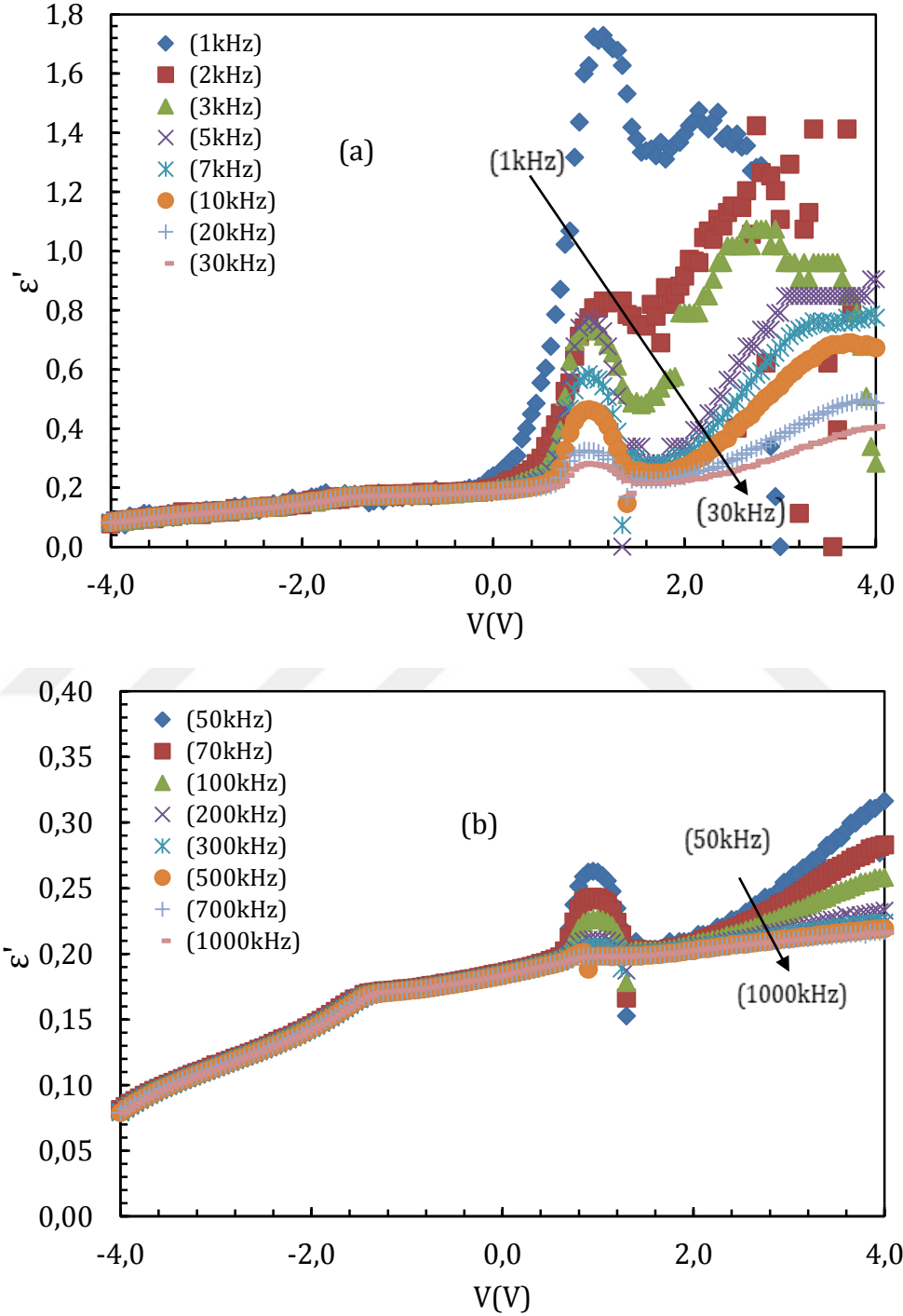
Şekil 5.30. $30\text{\AA}$ Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki σ_{ac} -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için

Voltaja bağlı ac elektriksel iletkenliği için $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında uygulanan gerilim altında Eşitlik (5.18) (Yıldız vd., 2010) kullanılarak oluşturulan frekansa bağlı grafikleri de Şekil 5. 30 (a) ve (b)' de çizilmiştir.

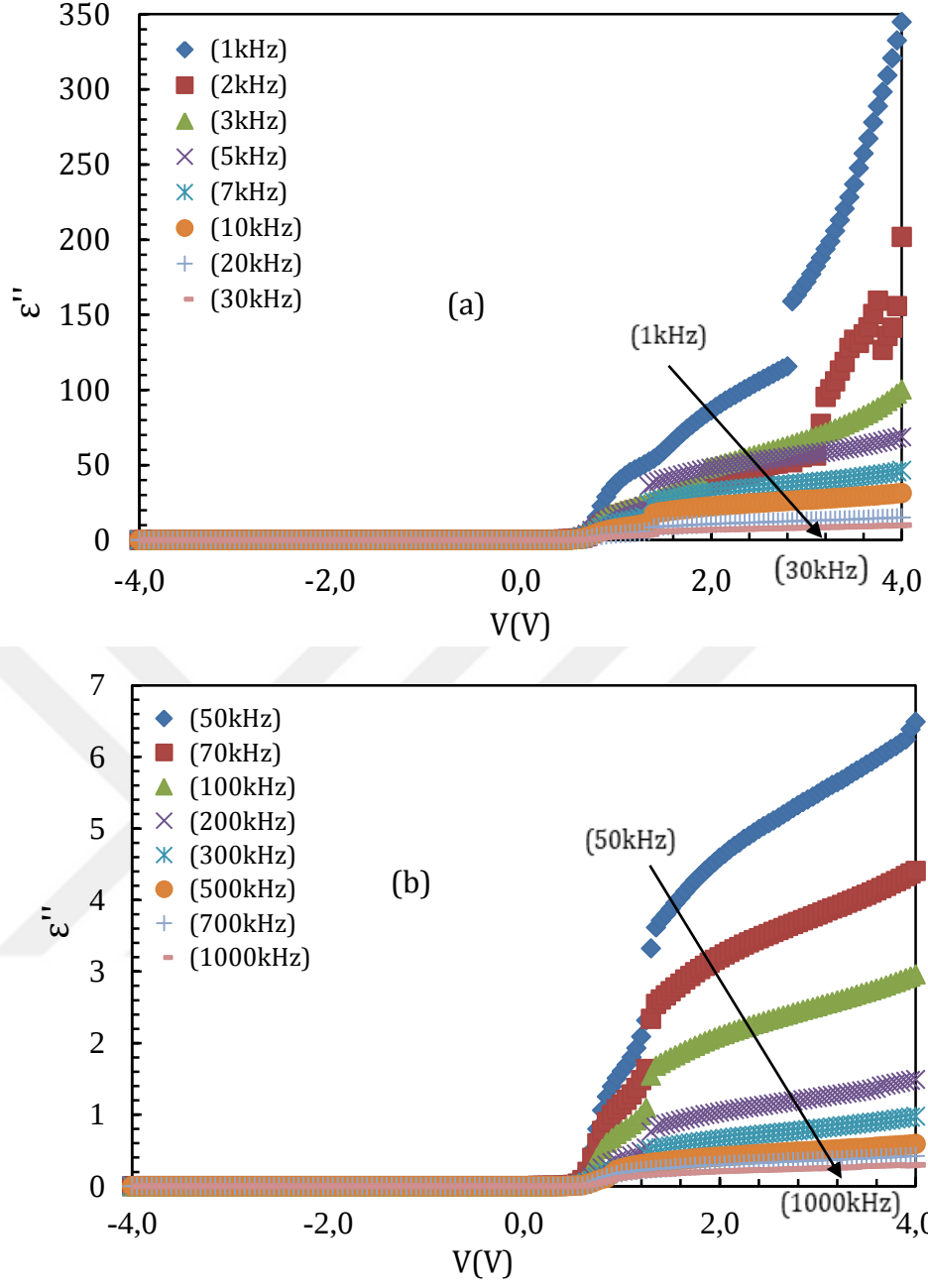
$$\sigma_{ac} = \omega C \tan \delta \left(\frac{d_{ox}}{A} \right) = \varepsilon'' \omega \varepsilon_0 \quad (5.18)$$

Şekil 5. 30 (a) ve (b)' de görüldüğü gibi ac elektriksel iletkenliği özellikle yığılım bölgesinde her bir frekans değeri için artan voltajla artarak hemen hemen lineer olmuştur. Ayrıca değişim her frekans artışında azalmıştır. Azalan frekansla artan σ_{ac} değerleri için ileri ters beslem bölgesinde artan gerilimle tersinim yüklerinin fazlalığı iletkenliğe katkı sağlarken; pozitif gerilim bölgesinde ise çoğunluk taşıyıcıları iletkenliği sağlamıştır. Ayrıca ac elektriksel iletkenlik değerlerinin frekansla değişimi girdap akımında (eddy current) değişime neden olmakta, bu değişim de kayıp açısı $\tan \delta$ ' da dolayısıyla da kayıp enerjide değişime neden olmuştur.

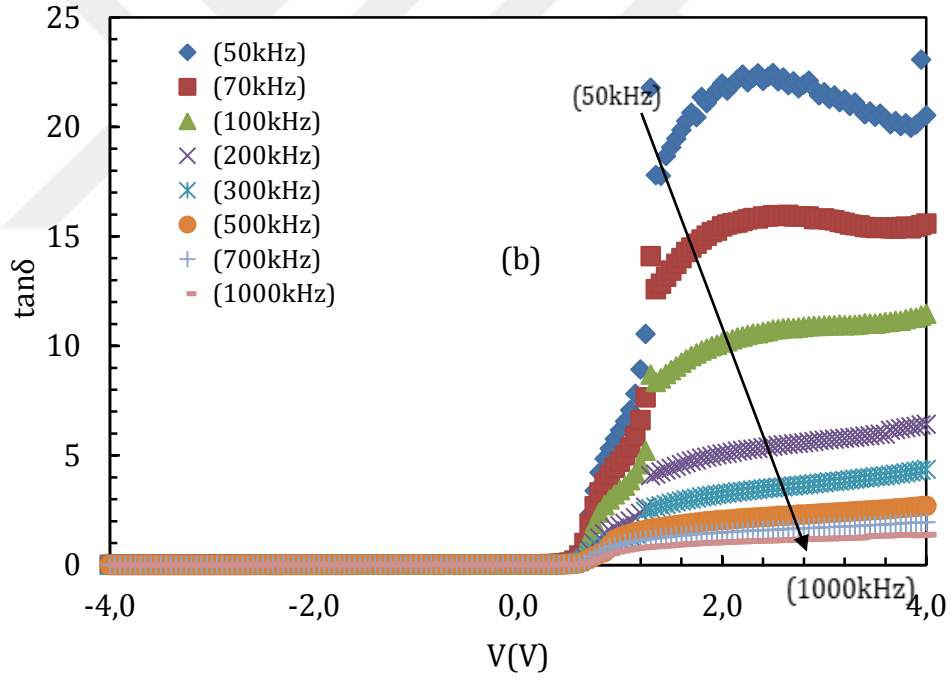
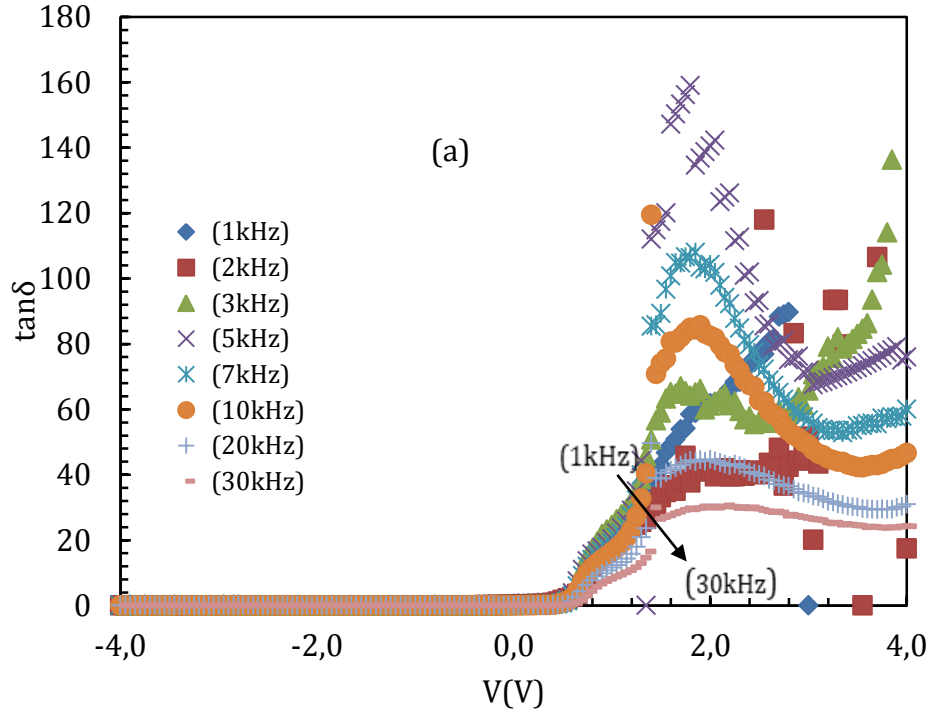
Şekil 5. (31-36) ve Şekil 5. (37-42)' de sırasıyla 50Å ile 100Å arayüzey kalınlıklı numunelerin oda sıcaklığında, (1kHz-1MHz) frekans aralığındaki dielektrik parametreleri ile *ac* elektriksel iletkenlikleri verilmiştir.



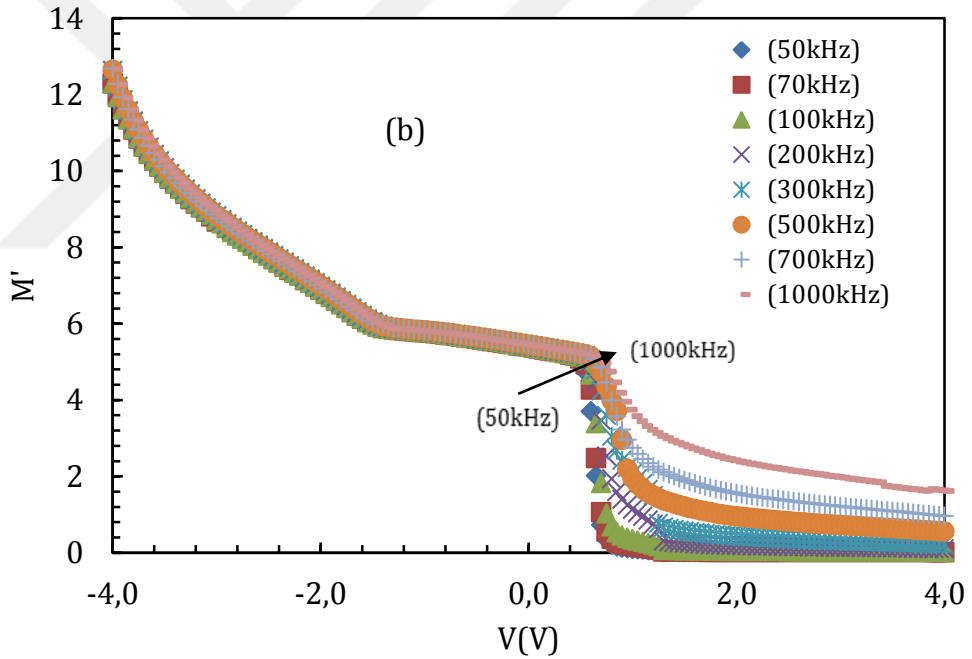
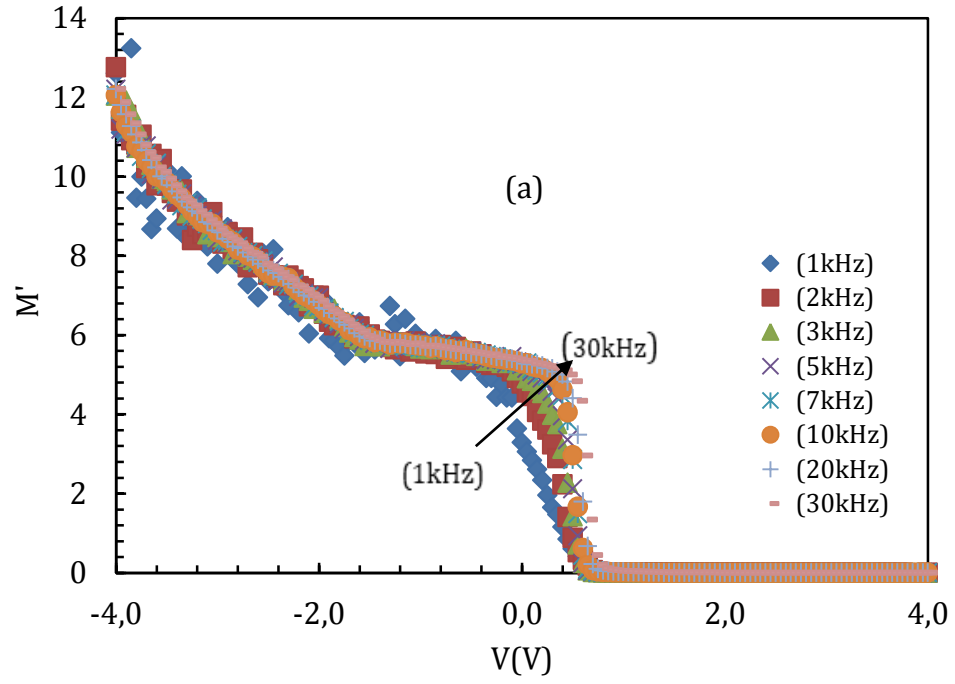
Şekil 5.31. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /*n*-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki ϵ' - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



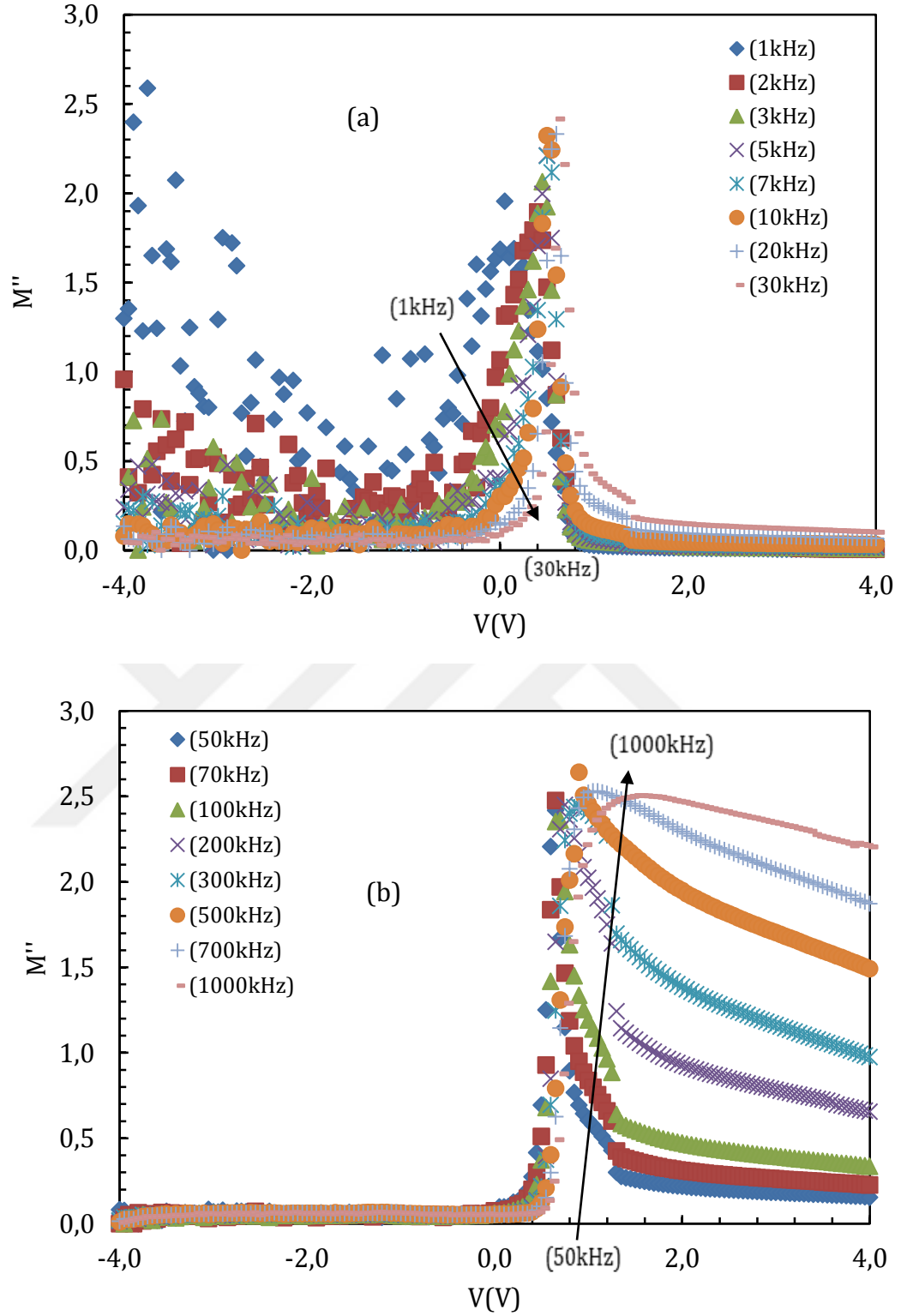
Şekil 5.32. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 / n -GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki ϵ'' - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



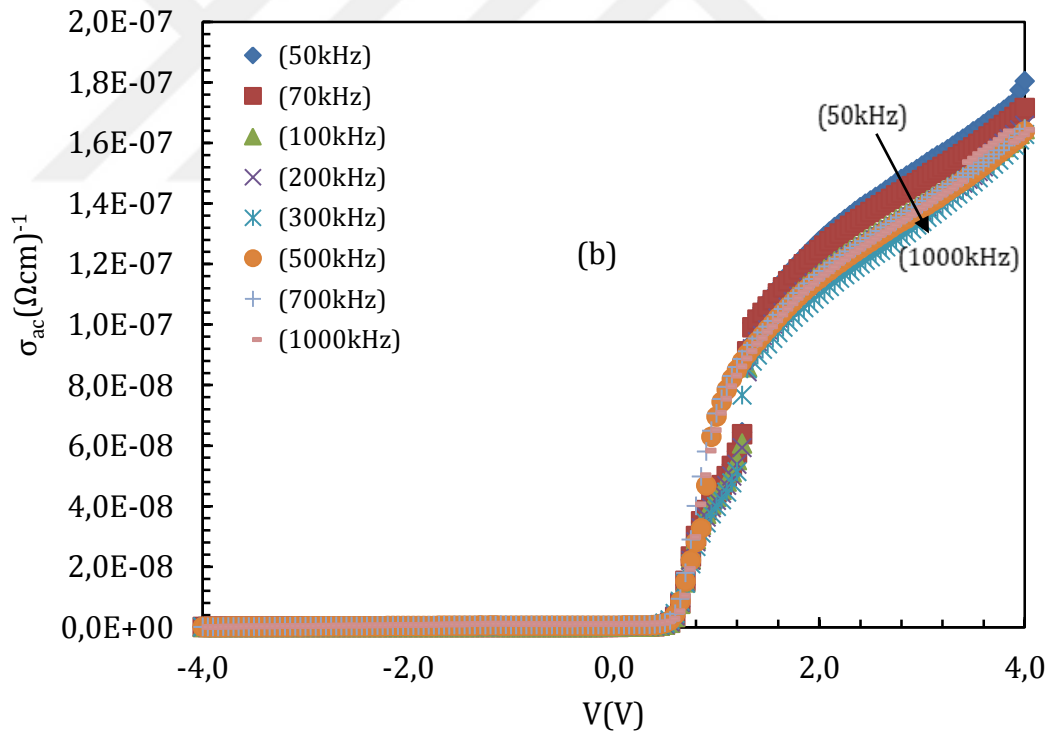
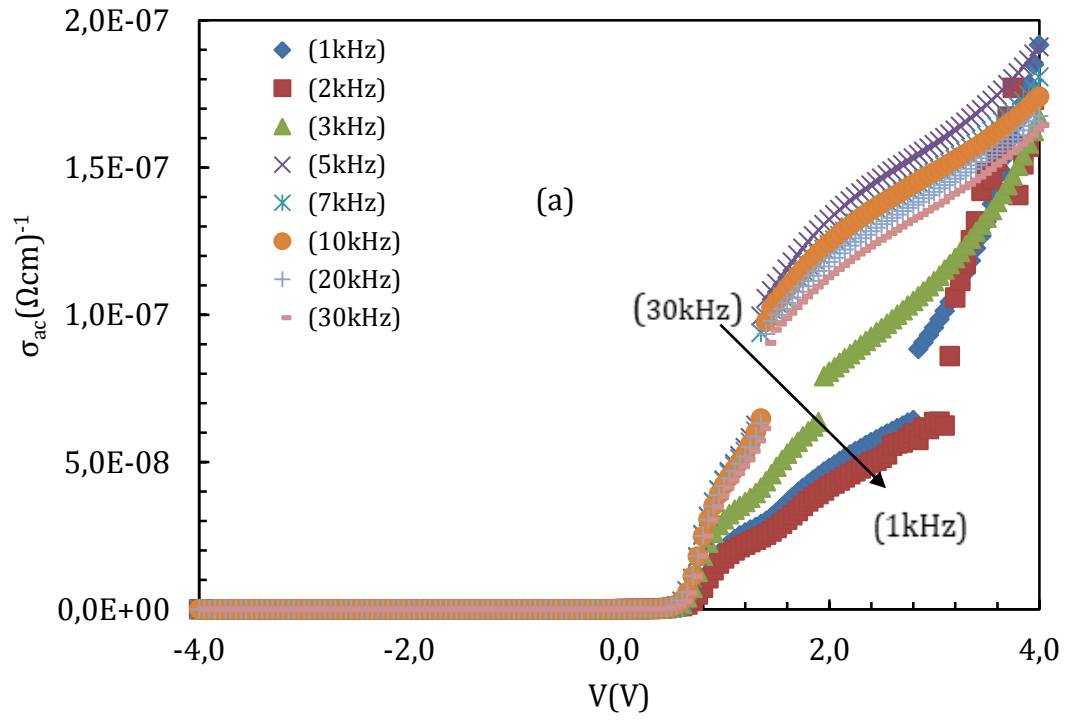
Şekil 5.33. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki $\tan\delta$ -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



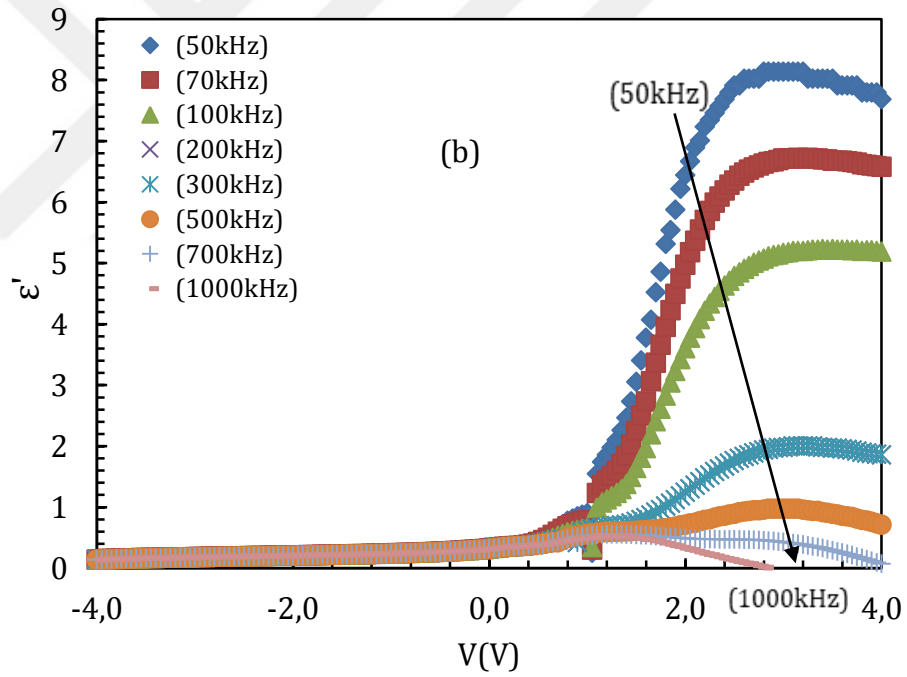
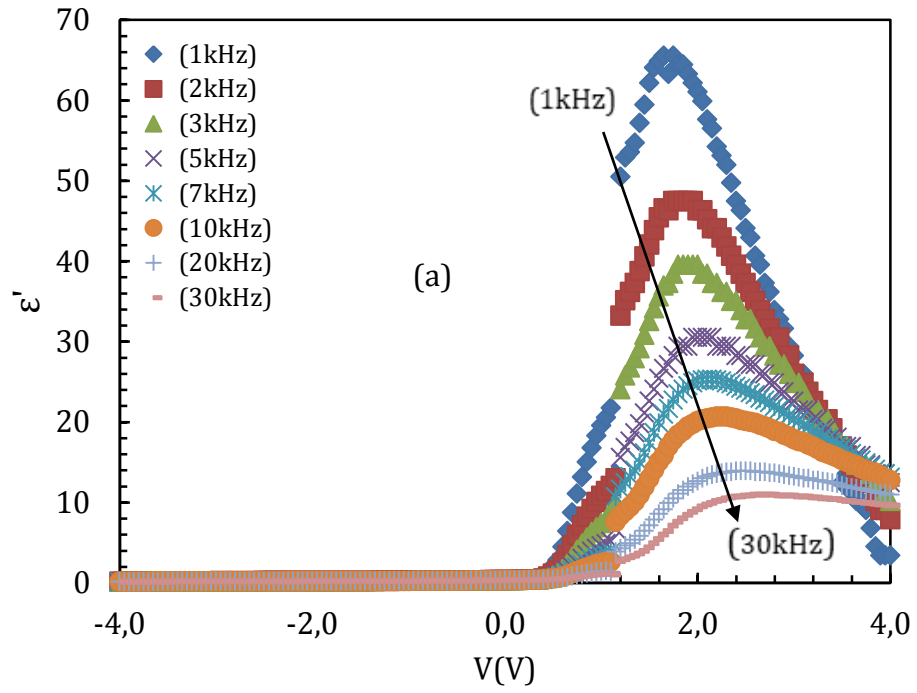
Şekil 5.34. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki M' - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



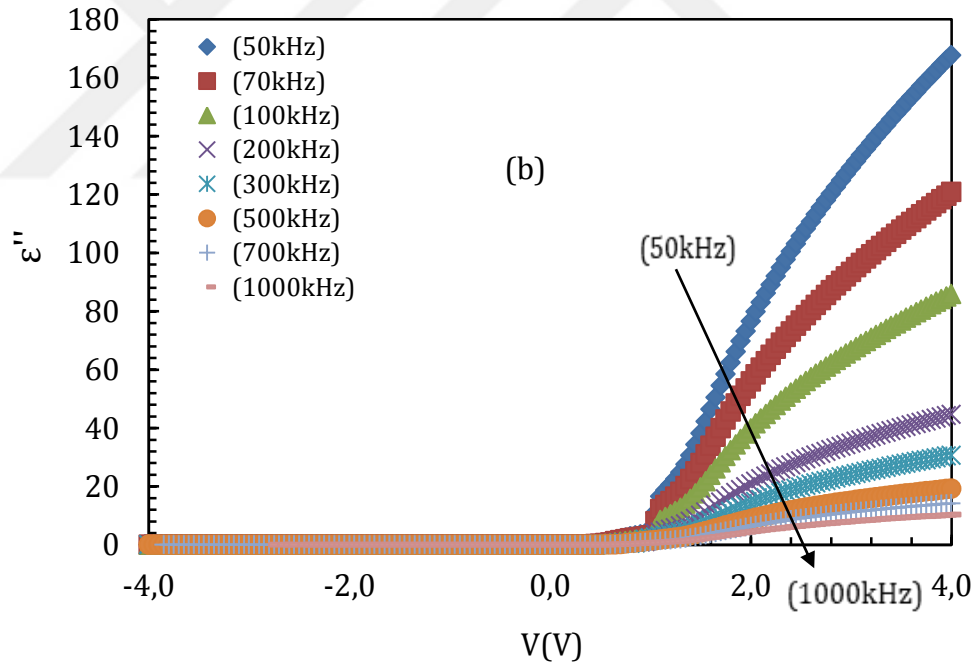
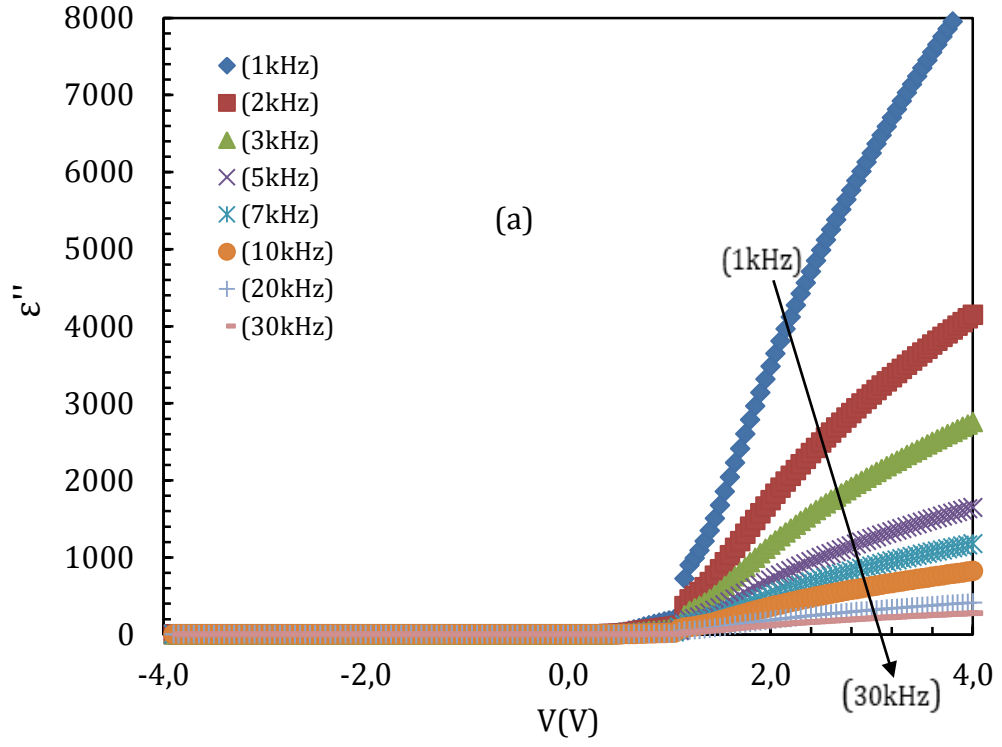
Şekil 5.35. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki M'' - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



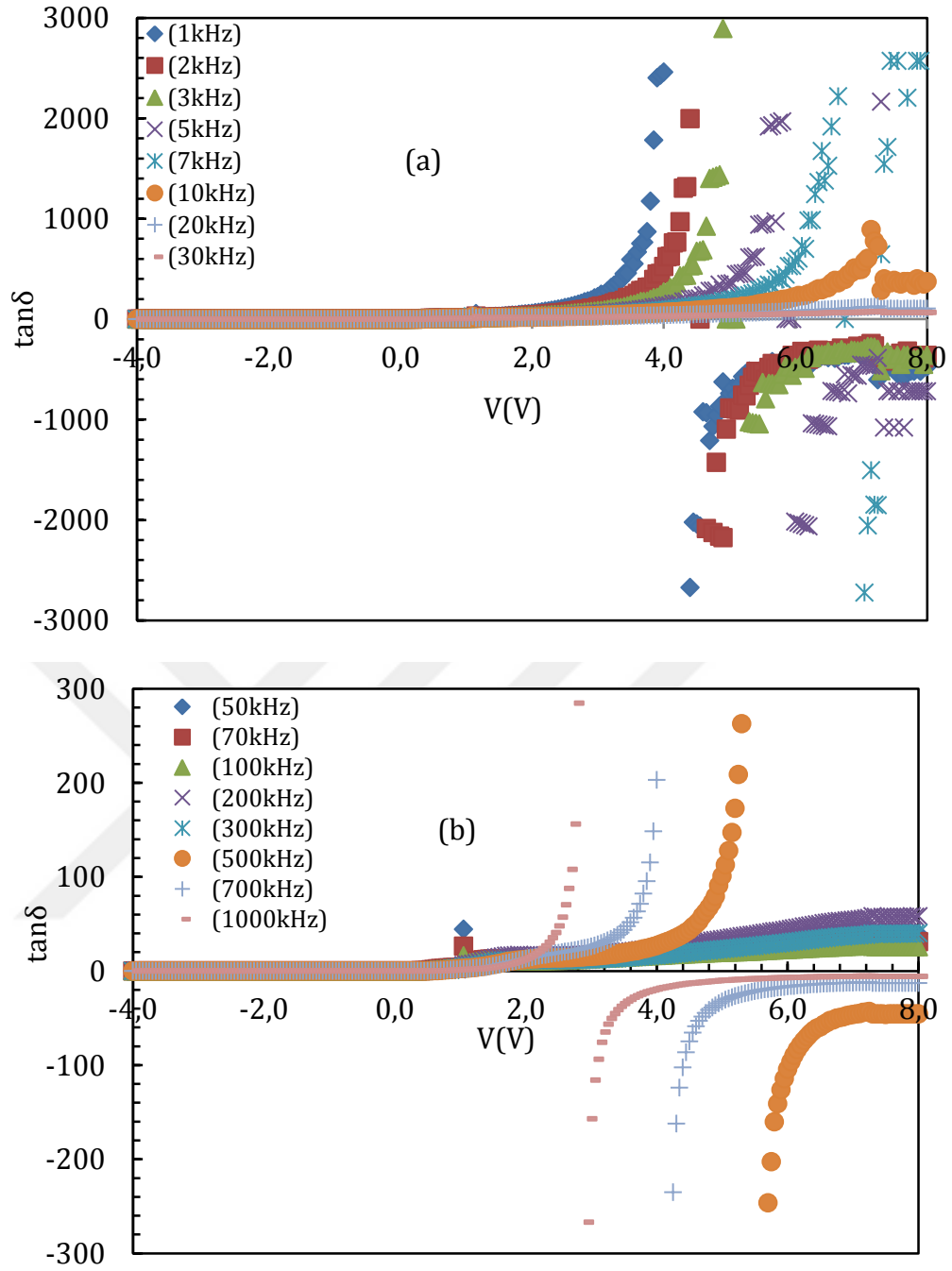
Şekil 5.36. 50Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki σ_{ac} -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



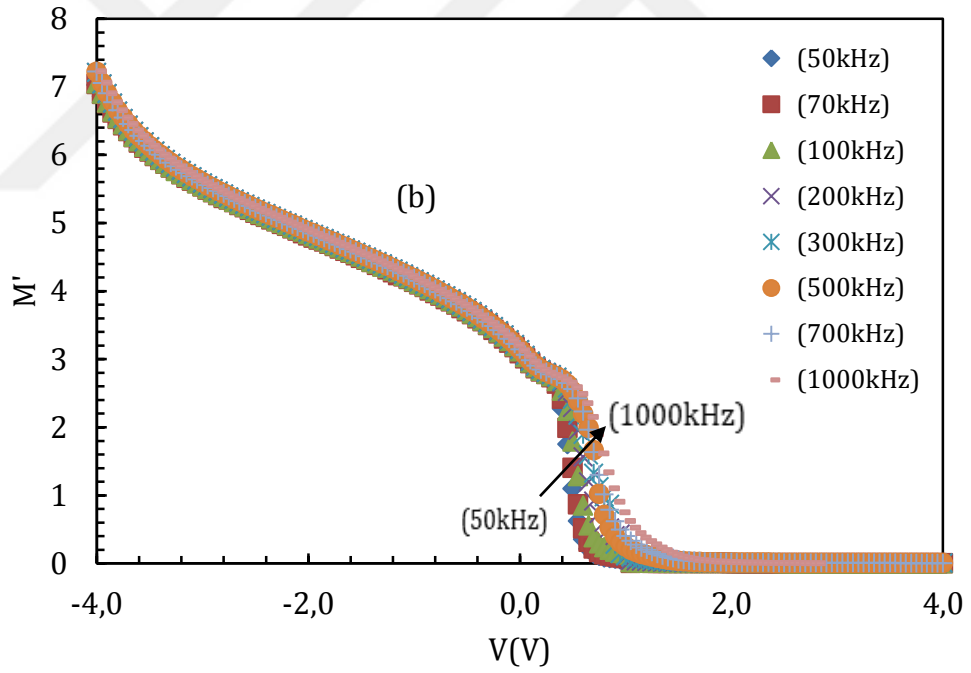
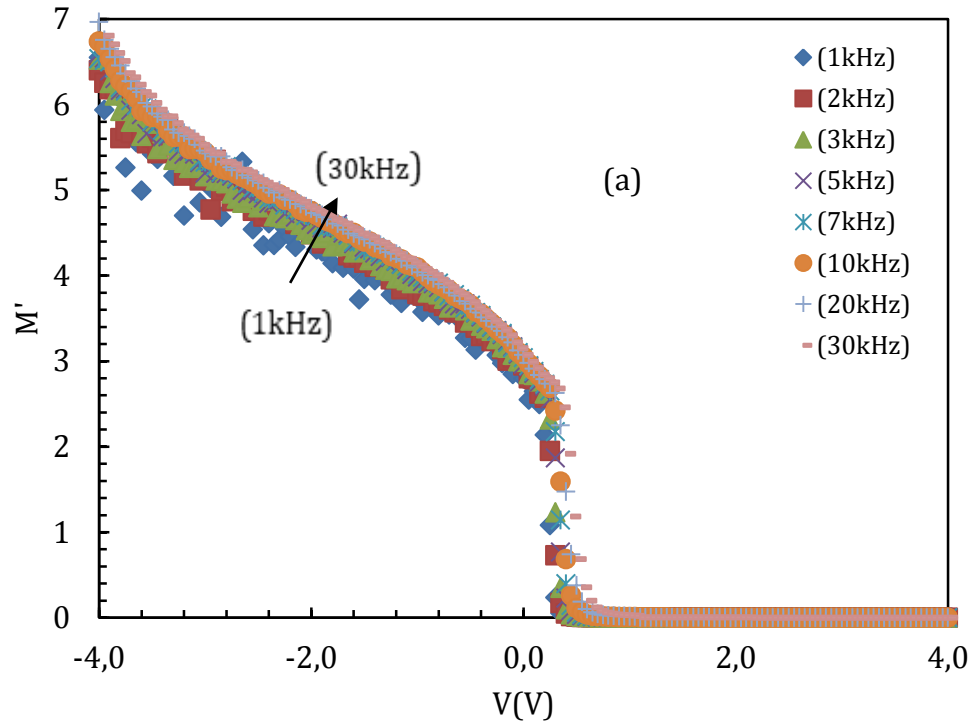
Şekil 5.37. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki ϵ'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



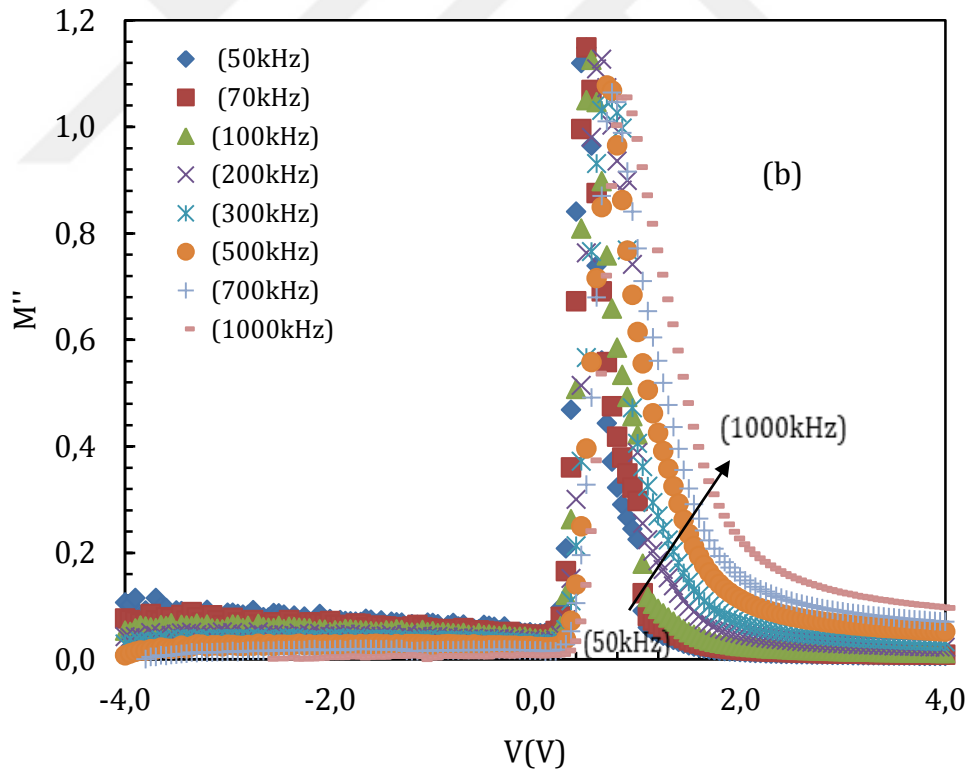
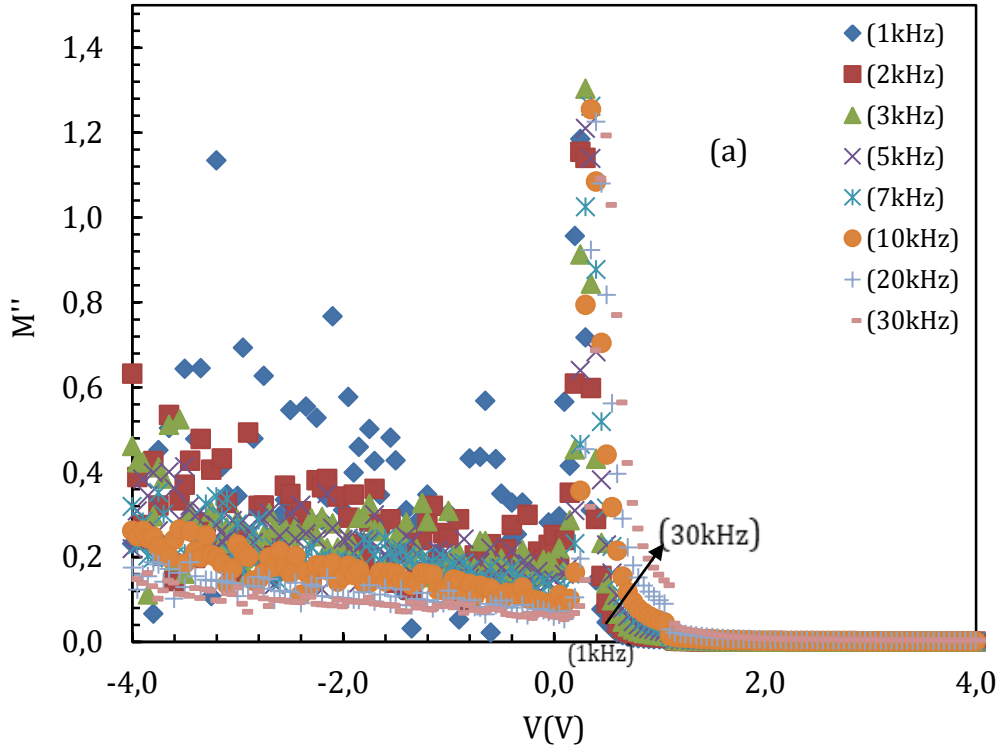
Şekil 5.38. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki ϵ'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



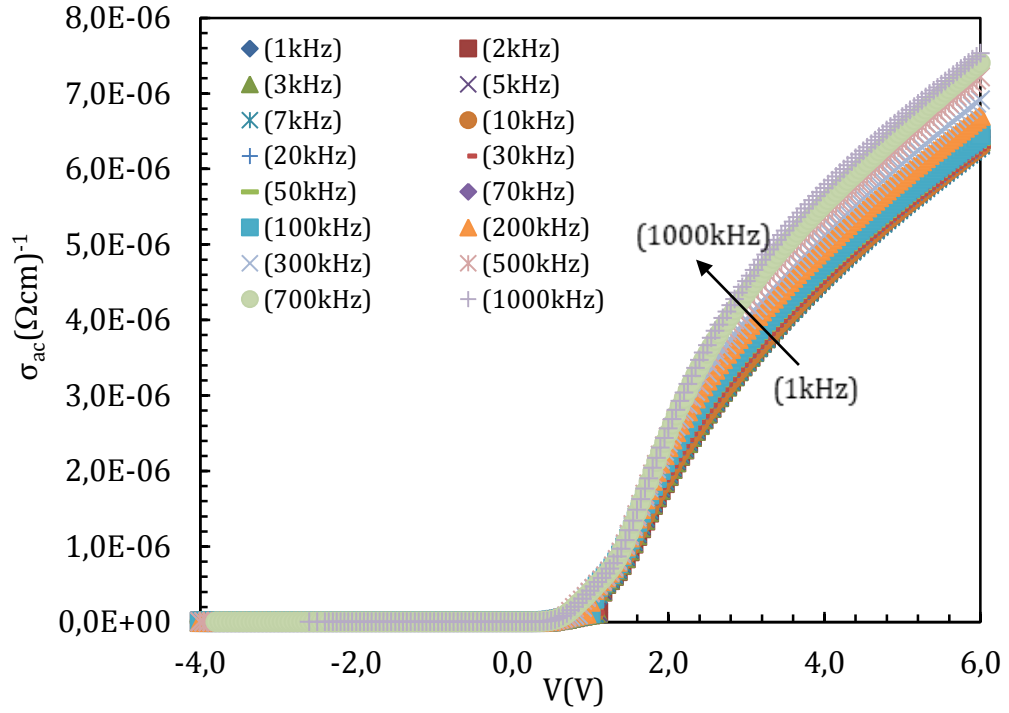
Şekil 5.39. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki $\tan\delta$ - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



Şekil 5.40. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki M' - V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



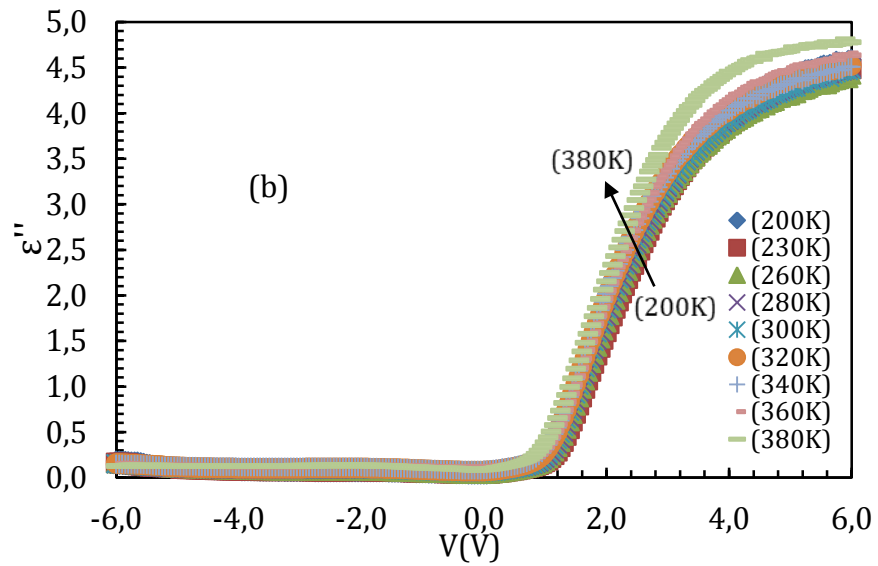
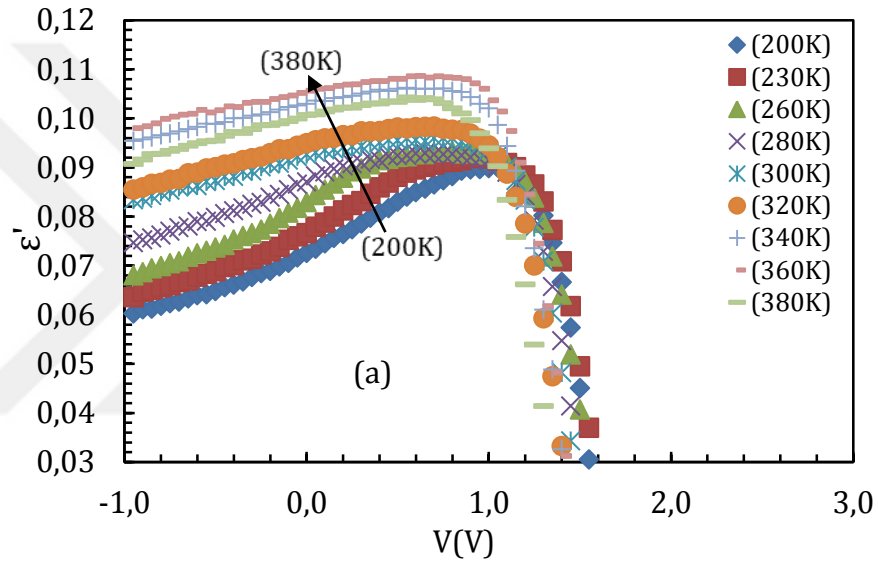
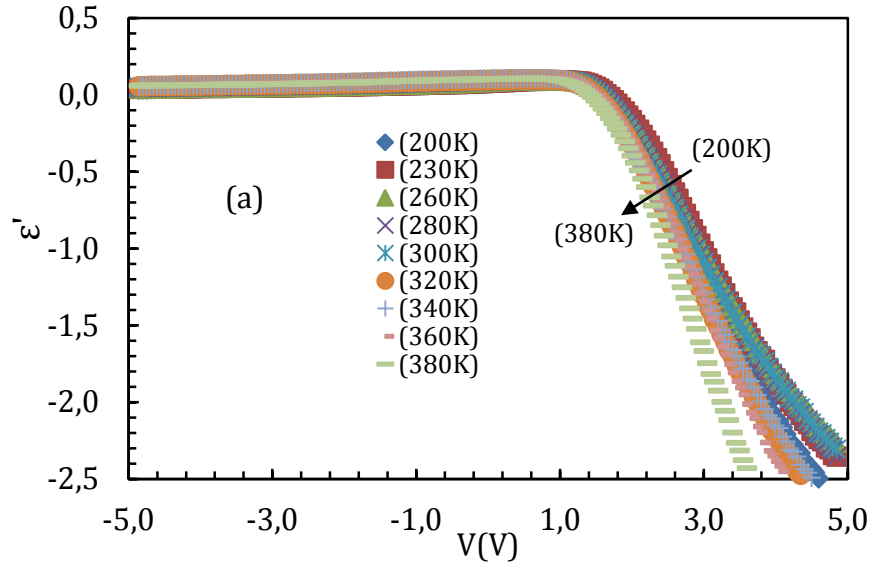
Şekil 5.41. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki M'' -V karakteristikleri a) 1kHz-30kHz ve b) 50kHz-1000kHz frekans aralıkları için



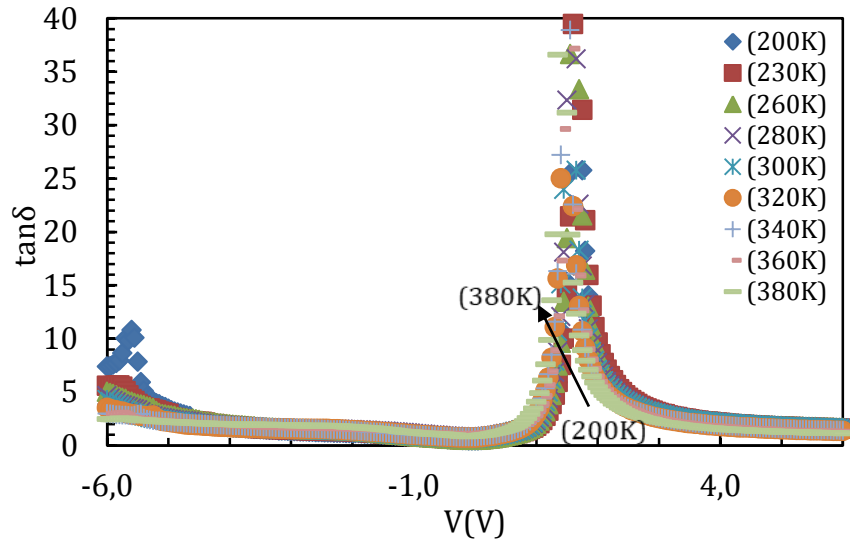
Şekil 5.42. 100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun oda sıcaklığında çeşitli frekans ölçümlerindeki σ_{ac} -V karakteristikleri

5.3.2. Farklı ara yüzey kalınlıklı numuneler için sıcaklığa bağlı dielektrik özellikler

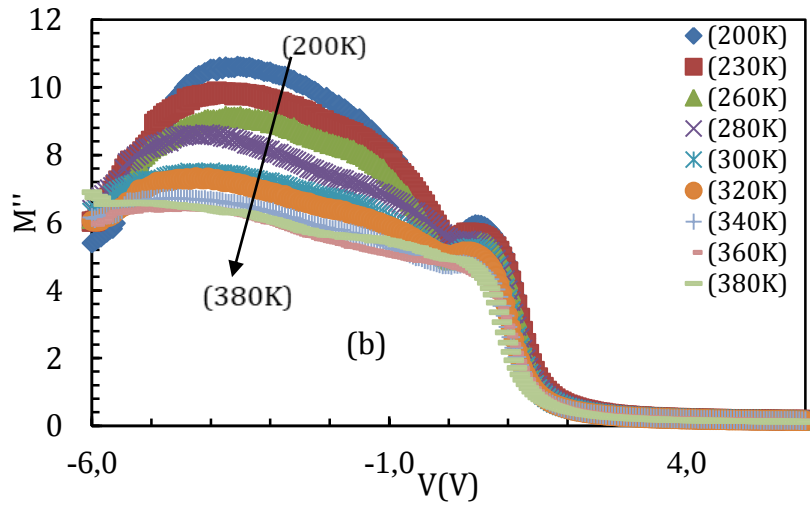
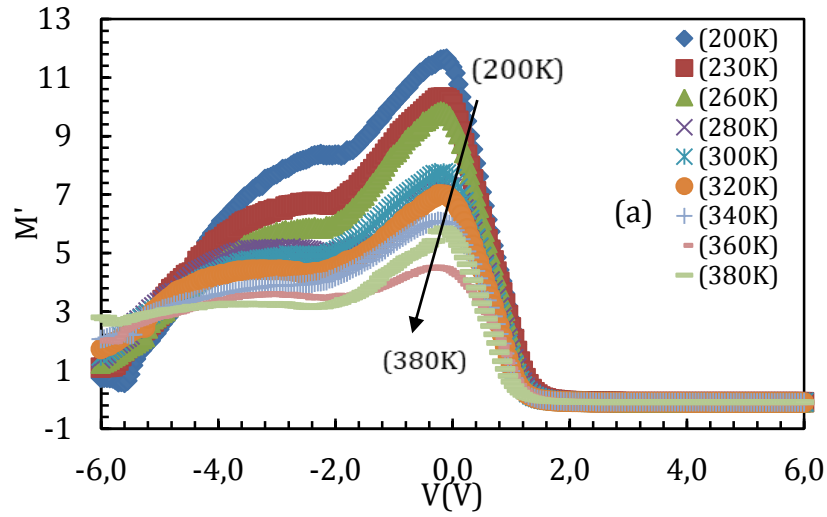
Bu bölümde farklı Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotların sıcaklığa bağlı dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp açısı ($\tan\delta$), elektrik modülü (M' , M'') ve ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) sıcaklığa ve voltaja bağlı olarak öncelikle 30Å ve 50Å arayüzey kalınlıklı numune sonuçlarına göre farklı sıcaklık ve voltaj aralıklarında incelenmiş olup aşağıda Şekil 5. (43-51) arasında sırasıyla verilmiştir.



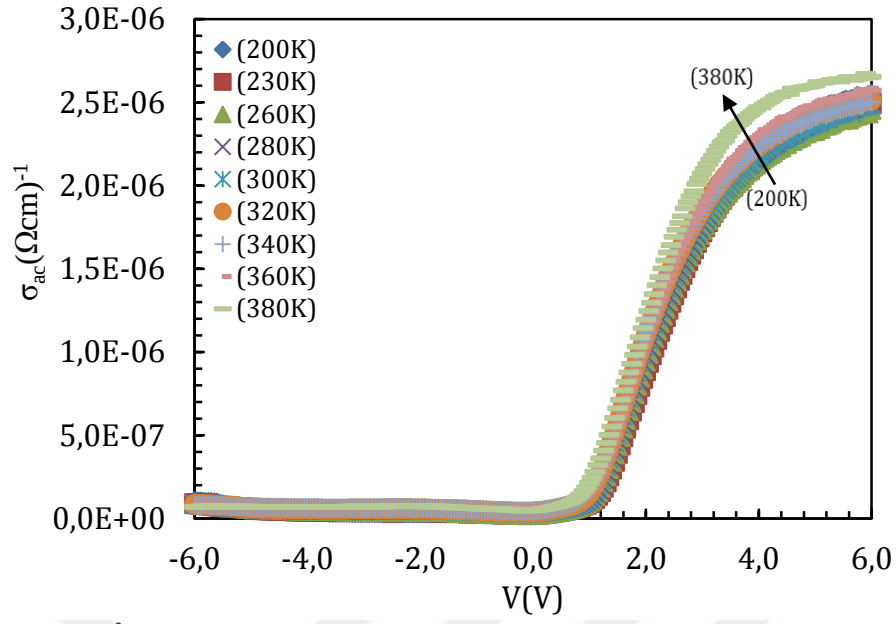
Şekil 5.43. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) Z'' -V (iki ayrı beslem bölgesine ayrılarak gösterilmiştir.) b) Z' -V karakteristikleri



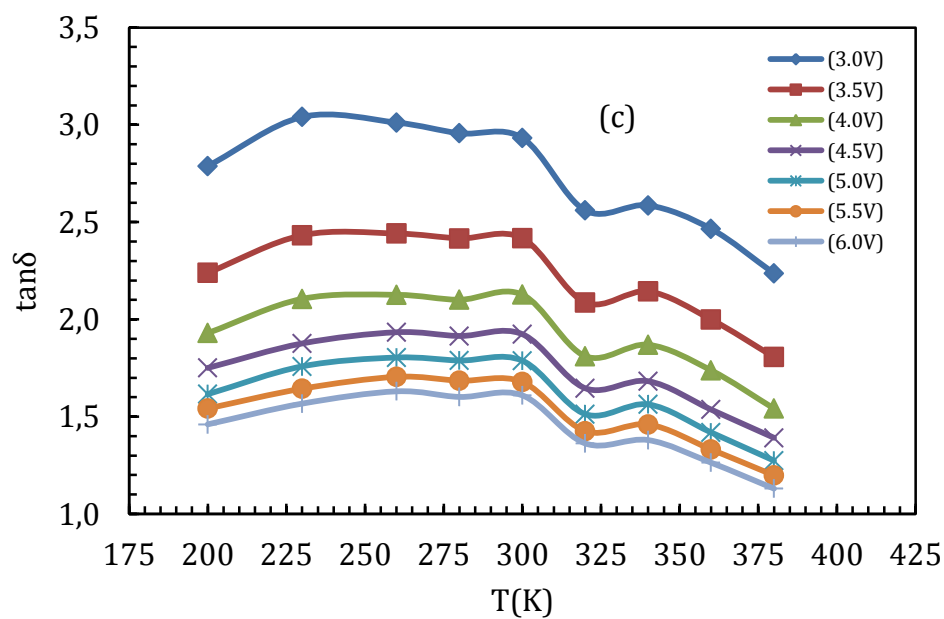
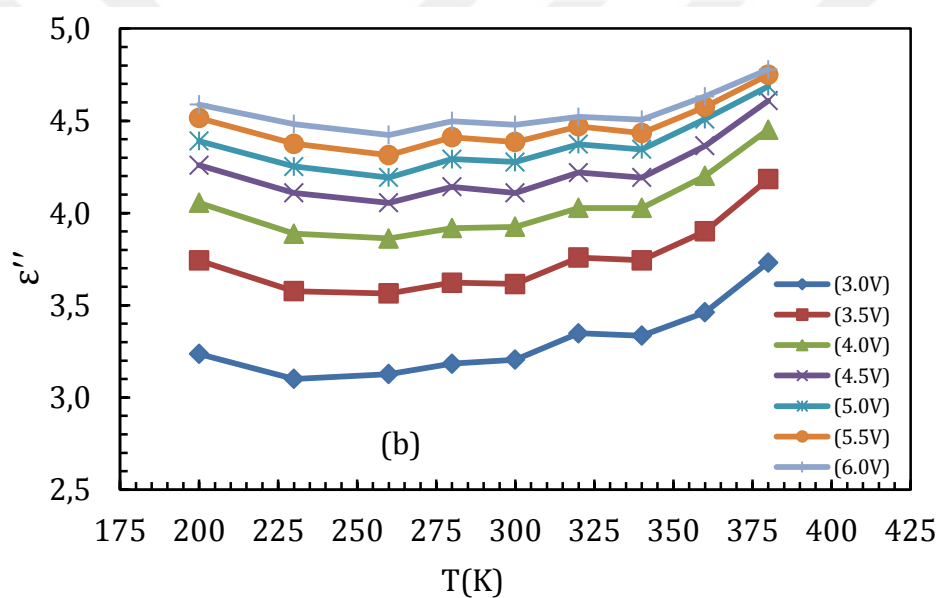
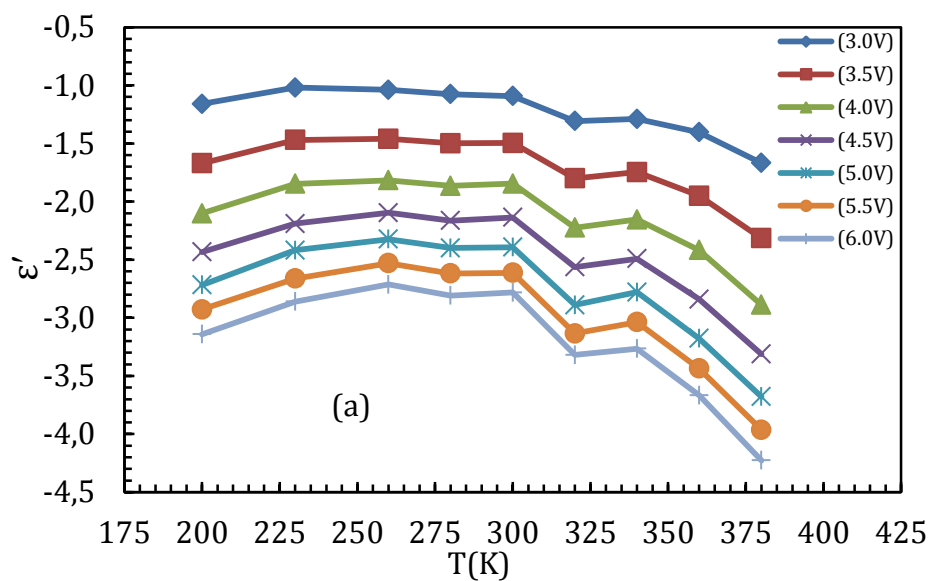
Şekil 5.44. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda $\tan\delta$ -V karakteristikleri

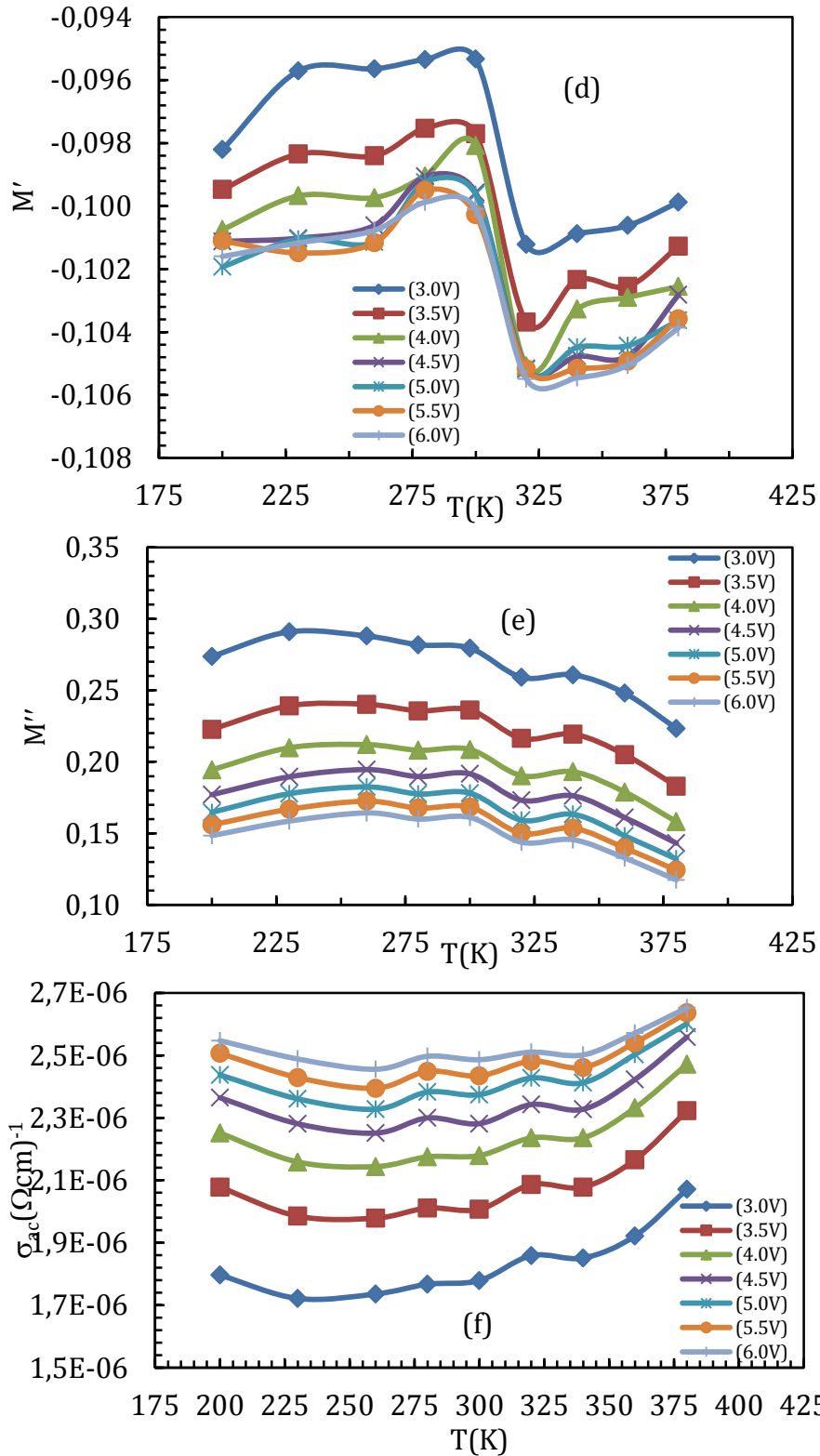


Şekil 5.45. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) M' -V, b) M'' -V karakteristikleri

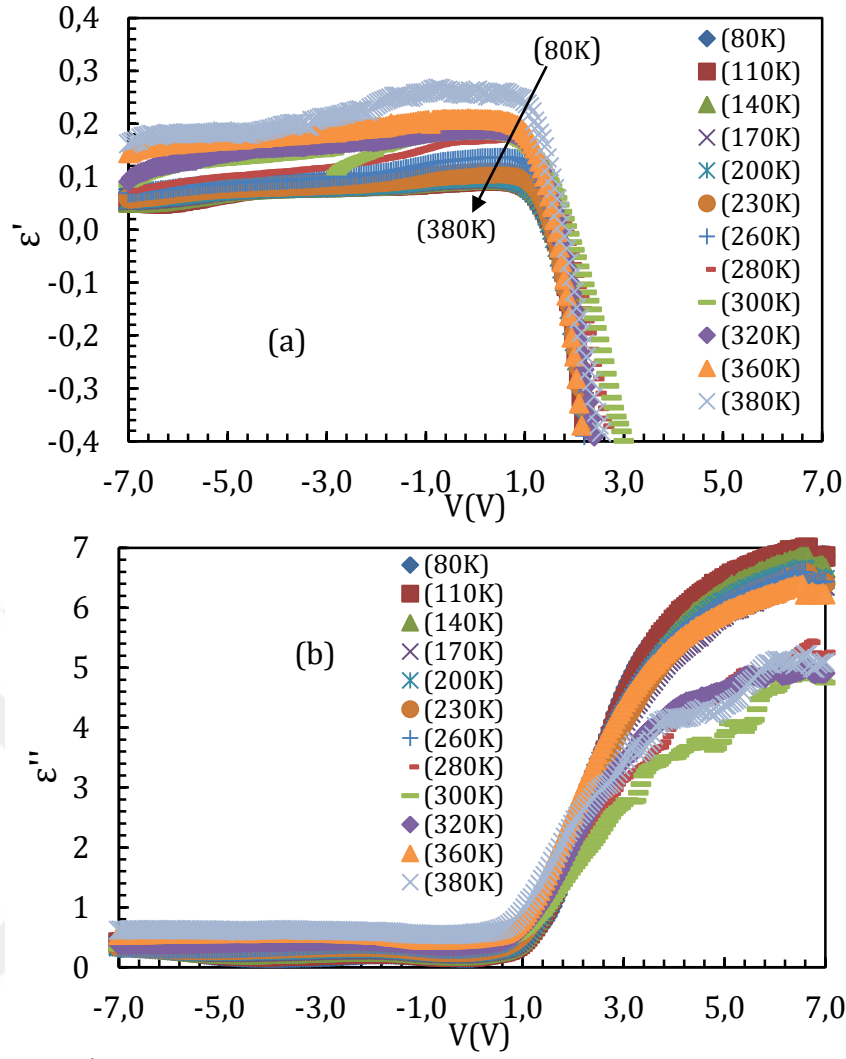


Şekil 5.46. 30Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda σ_{ac} -V karakteristikleri

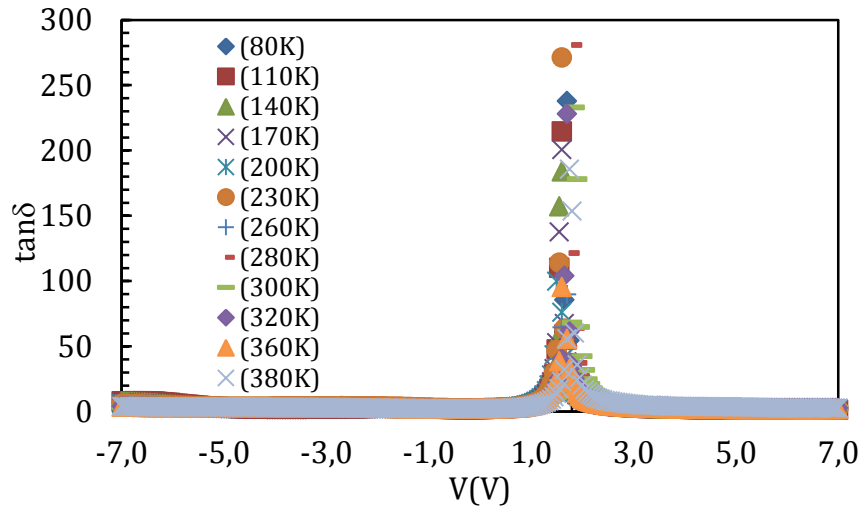




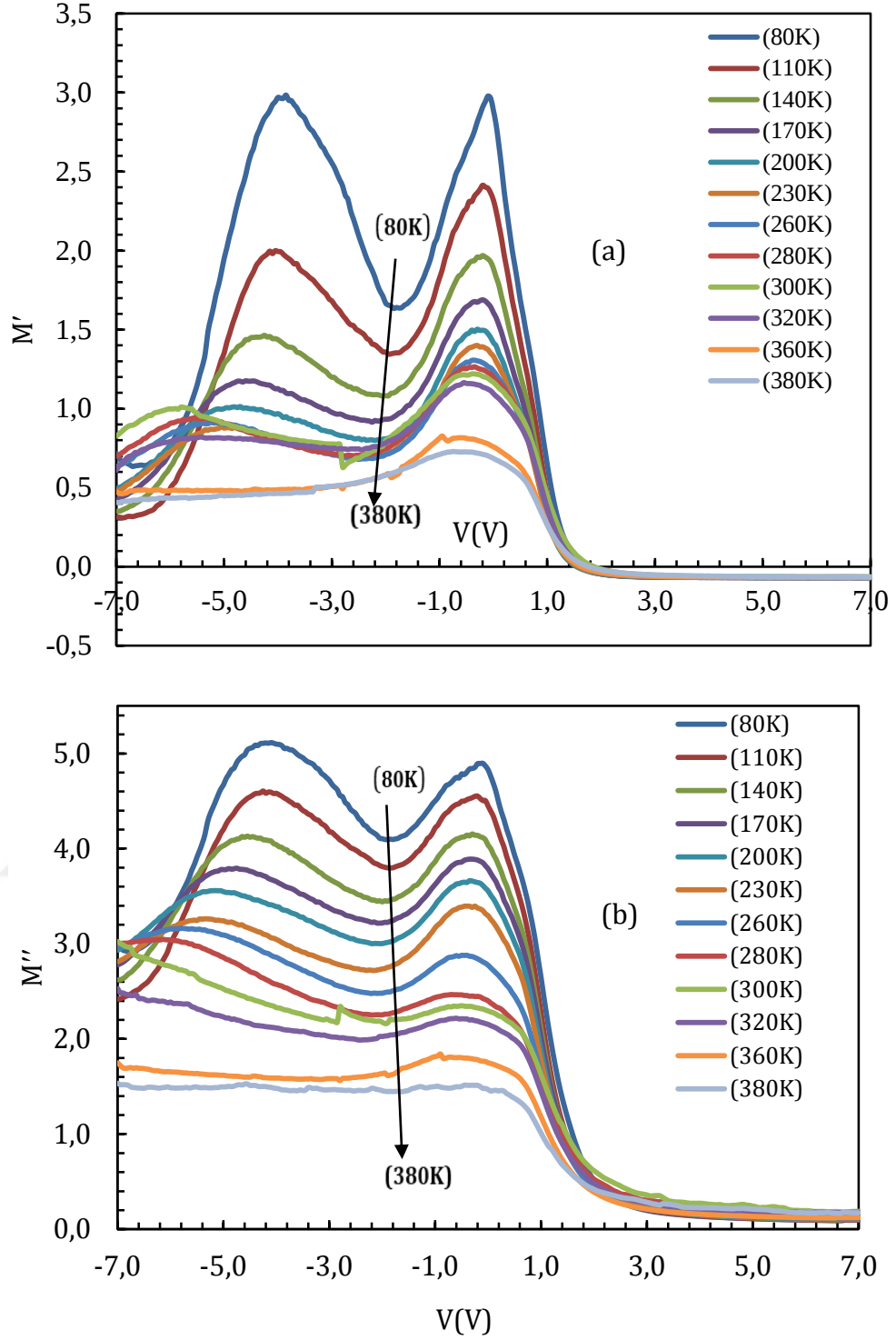
Şekil 5.47. 30Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 / n -GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli doğru beslem voltajlarında sırasıyla a) ϵ' -T, b) ϵ'' -T, c) $\tan\delta$ -T, d) M' -T, e) M'' -T ve f) σ_{ac} -T karakteristikleri



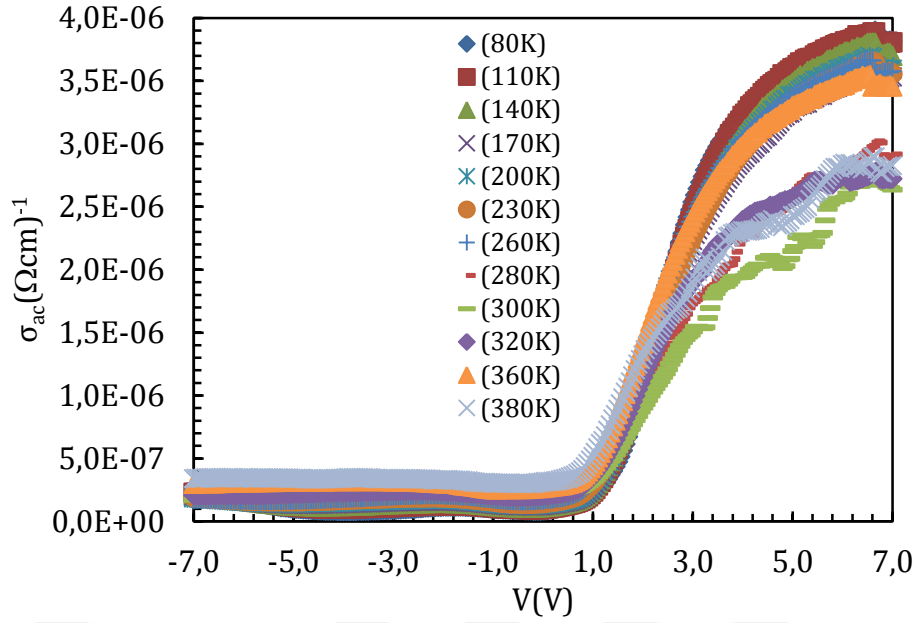
Şekil 5.48. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) ϵ' -V, b) ϵ'' -V karakteristikleri



Şekil 5.49. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda $\tan\delta$ -V karakteristikleri



Şekil 5.50. 50Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) M' -V, b) M'' -V karakteristikleri



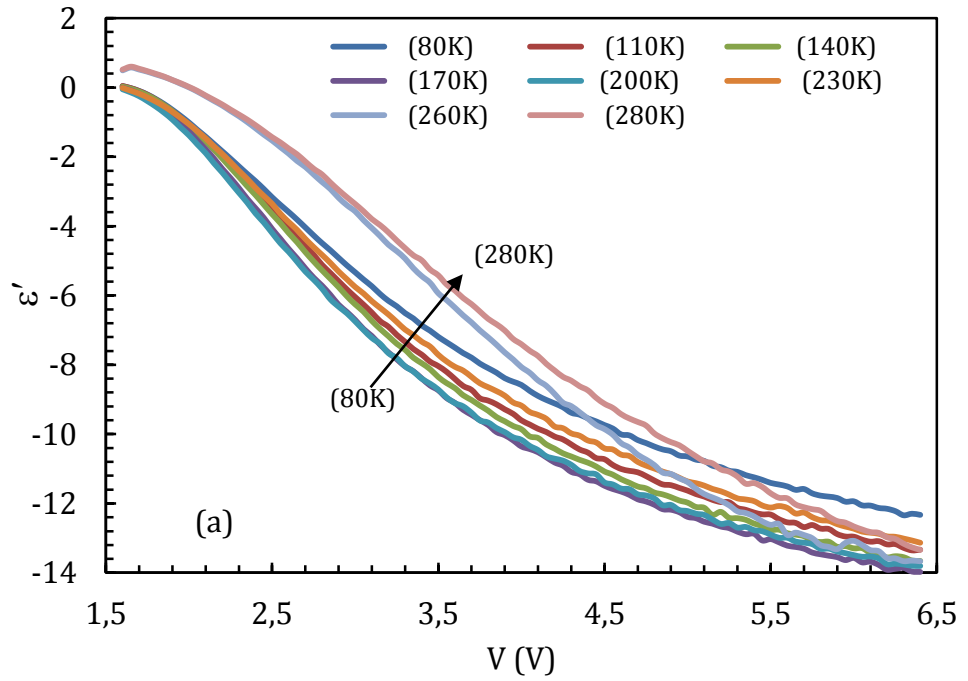
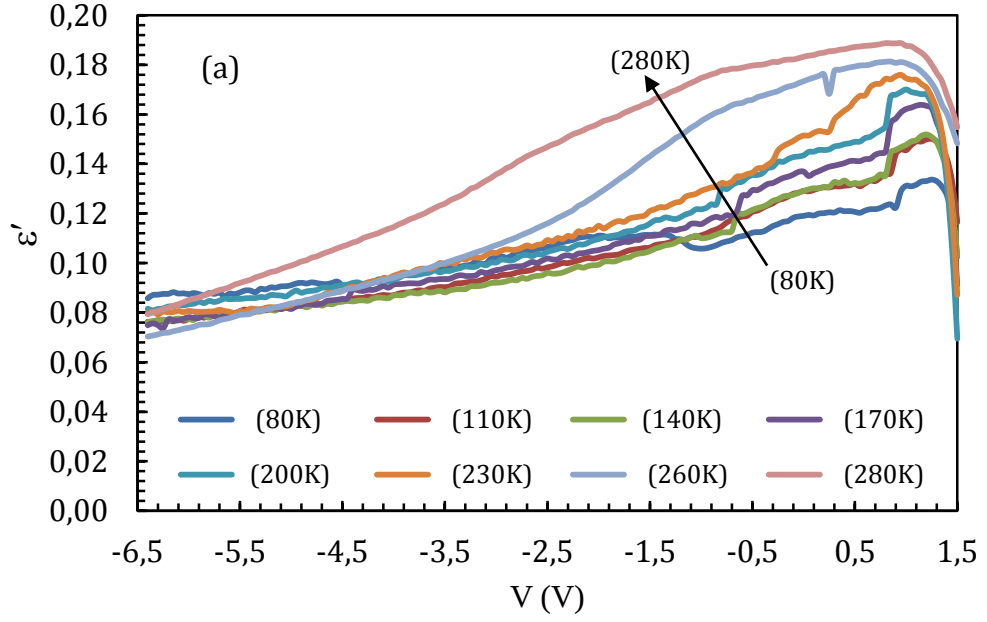
Şekil 5.51. 50Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda σ_{ac} -V karakteristikleri

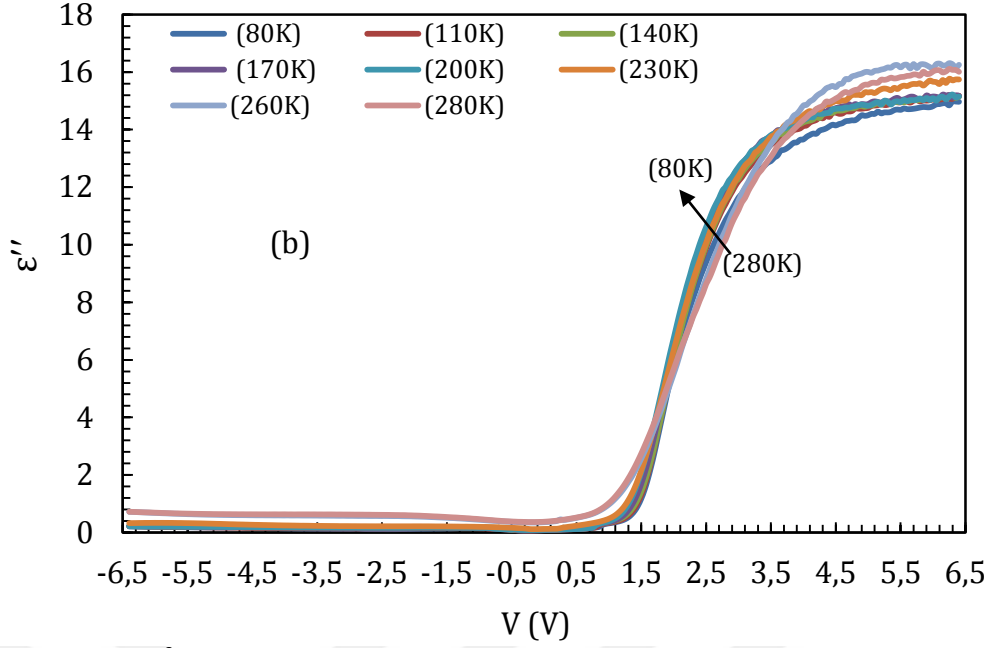
100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de (80-280K) sıcaklık aralığında M' ve M'' , σ_{ac} , ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerleri kapasitans-kondüktans ölçümleri kullanılarak değerlendirilmiştir. M/S arayüzeyinde 100Å oksit ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS yapısı için kompleks geçirgenlik (ϵ^*) formu daha önce frekansa bağlı dielektrik karakteristiklerinin incelendiği Bölüm 5.3.1' de Eşitlik (5.12)' de kapalı; Eşitlik (5.13)' de açık formda verilmiştir. Eşitlik (5.13)' de kompleks geçirgenliğin sırasıyla gerçek ve sanal kısımları ϵ' ve ϵ'' gösterilmiştir.

Yine oksit tabaka kapasitansı (C_{ox}) Bölüm 5.3.1 ve önceki bölümlerde de açıklanmış olup Eşitlik (5.11)' de ifade edilmiştir. Burada oksit kapasitansını hesaplamayabilmek için Eşitlik (5.11)' deki ara yüzey oksit tabakası kalınlığı d_{ox} kullanılarak bu eşitlik ($C_{ox} = \epsilon_r \epsilon_0 A / d_{ox}$) şeklinde verilir. Burada ϵ_r ' nin Al₂O₃ için 6.8 olan değeri onun bağıl geçirgenliğidir (Güçlü vd., 2016b; Türüt vd., 2015b). Ayrıca $\tan\delta$ değerleri de Eşitlik (5.16)' da verildiği gibi dielektrik sabitinin sanal kısmının gerçek kısmına oranından (ϵ''/ϵ') veya numunenin ölçülen C ve G değerlerinden elde edilmiştir.

Şekil 5.52' de 100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda ϵ' -V ve ϵ'' -V

karakteristikleri gösterilmiştir. Bu grafiklerden anlaşıldığı gibi ε' ve ε'' değerleri uygulanan gerilime kesinlikle bağlıdır ve dielektrik sabitinin negatif değeri doğru beslemdeki negatif kapasite nedeniyle gözlenmiştir.



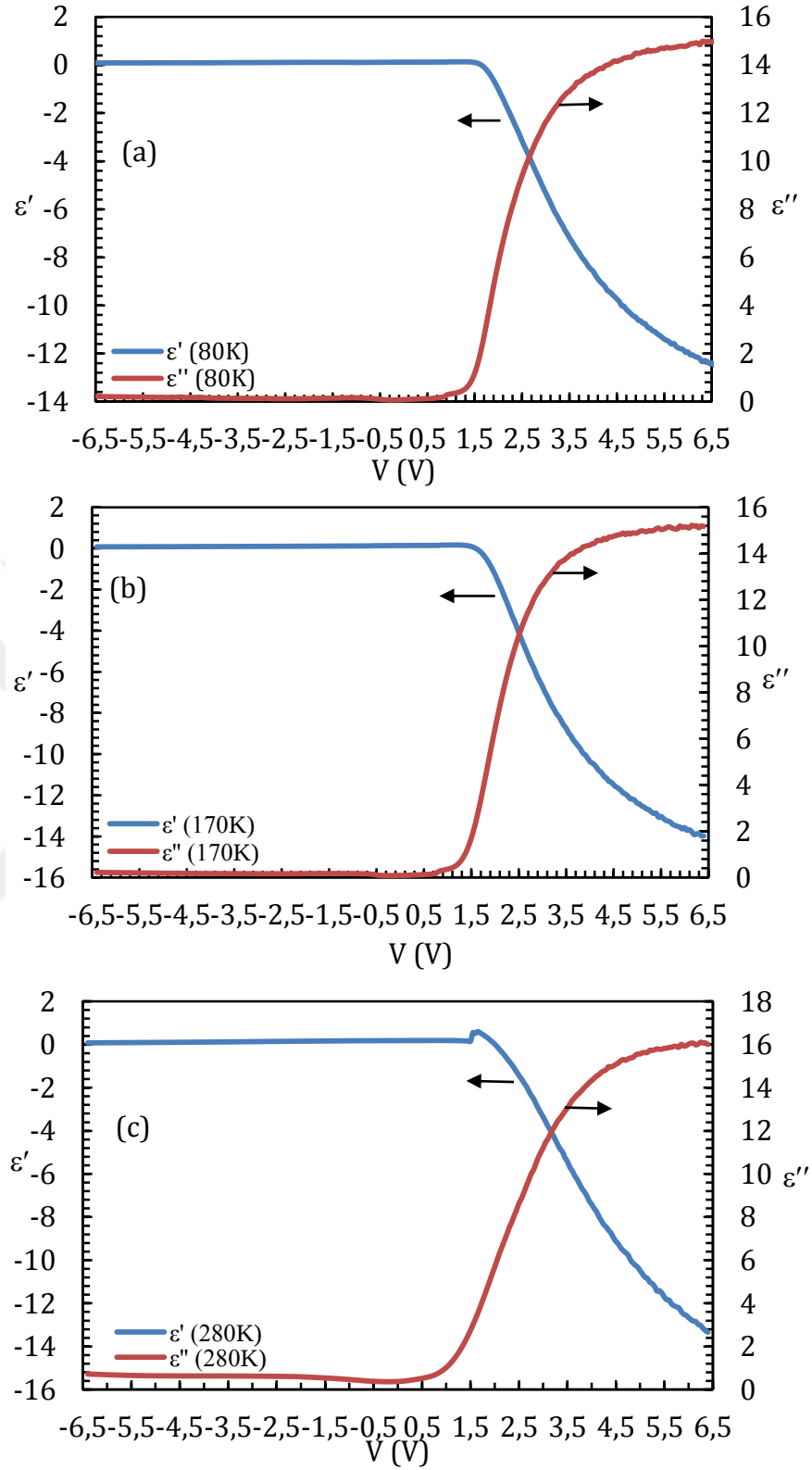


Şekil 5.52. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) ϵ' -V (iki ayrı beslem bölgesine ayrılarak gösterilmiştir.) b) ϵ'' -V karakteristikleri

Şekil 5.52 (a)' da açıkça görüldüğü gibi ϵ' -V grafikleri belli bir doğru beslem voltajında ve sonrasında ($\sim 1.5\text{V}$) anormal bir davranış göstererek negatif dielektrik sabiti (NDC) değerleri artan sıcaklıkla azalmıştır. Ayrıca ϵ' -V ve ϵ'' -V eğrileri pozitif voltaj bölgesine doğru kesişme davranışı göstermiştir. Şekil 5.52 (b)' de ise özellikle yığılma bölgesinde uygulanan voltaj arttıkça ϵ' ve ϵ'' arasında zıtlık sözkonusu olmuştur ve bu değişim iletkenlik davranışına benzemiştir.

Yük taşıyıcılarının enjeksiyonunun lokalize ara yüzey tuzaklarına/durumlarına atlama (hopping) işlemini içerdiğine inanılmaktadır fakat enjeksiyonun ayrıntılı fiziksel mekanizmaları yakın zamana kadar tam olarak açıklanamamıştır. $\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS yapısının ϵ' -V-T ve ϵ'' -V-T karakteristiklerinin önemli sonucu farklı sıcaklıklarda ϵ' ve ϵ'' nün ters davranışlarıdır.

Şekil 5.53 (a), (b) ve (c)' de gösterildiği gibi NDC' deki azalma, yığılma bölgesinde dielektrik kaybın artışı anlamına gelir.

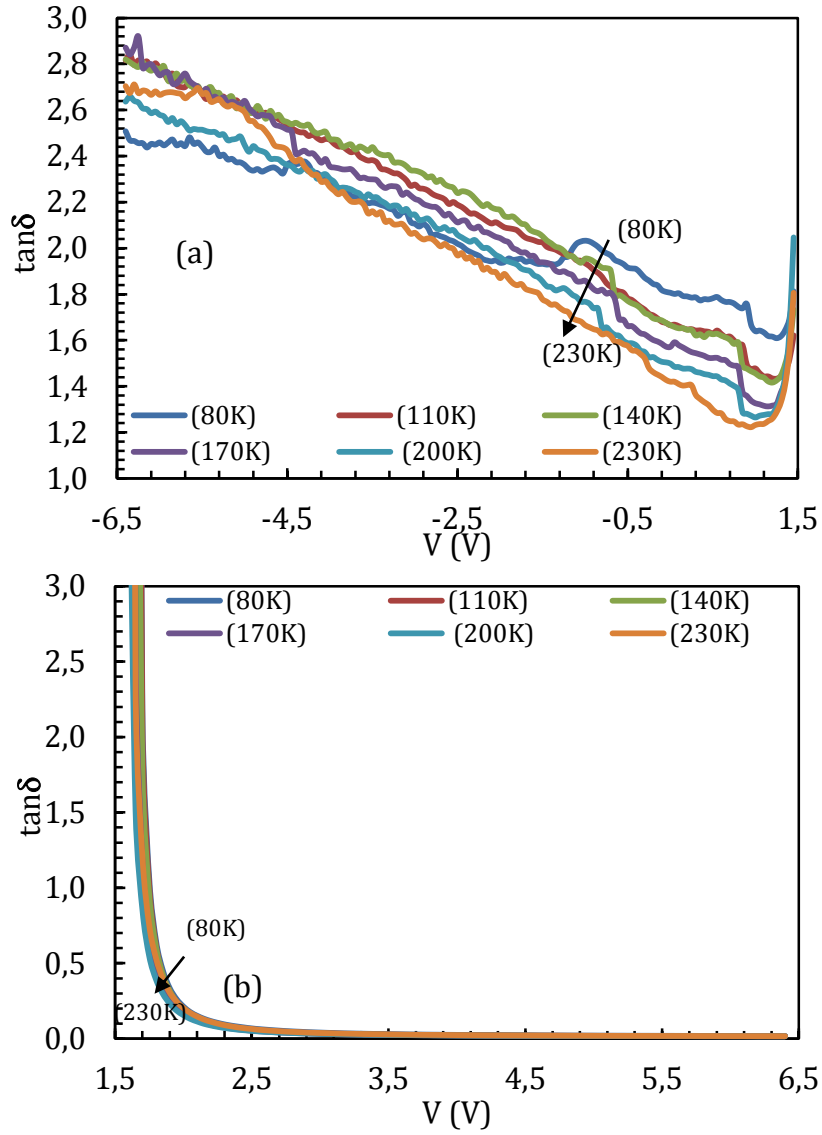


Şekil 5.53. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de sırasıyla (a) 80K, (b) 170K, (c) 280K' de ϵ' -V ve ϵ'' -V karakteristiklerinin karşılaştırılması

Şekillerden de açıkça görüldüğü gibi her sıcaklık değeri için anormal pik sonrası ϵ' değeri düşmeye başlamıştır. Bu davranışın anlamı M/S ara yüzeyinde ara

yüzey tabakasının dielektrik sabitinin doğal ya da biriktirilmiş olması, polarizasyon mekanizması nedeniyle sıcaklık karşısında azalması demektir. Bu durum M/S ara yüzeyinde lokalize tuzaklardan kaçmak için yeterli enerjiye sahip olan tuzak yüklerine atfedilmiştir (Vural vd., 2012; Korucu vd., 2013a). Aynı yığılım bölgesinde dielektrik sabitine zıt olarak dielektrik kayıp değeri artan gerilim ve sıcaklıkla ani olarak artmaya başlamıştır. Başka bir deyişle ϵ'' 'nin minimum değeri ϵ'' 'nin maksimum değeriyle örtüşür.

Ara yüzey tabakası ve ara yüzeyle yarıiletken arasındaki lokalize N_{ss} 'nin varlığının arayüzeyde bir yük dipolü oluşturduğu bilinmektedir. Doğru beslem altında diyota uygulanan voltajın çoğu yarıiletken cihazın seri direnci ve ara yüzey dipolü tarafından paylaşılır (Çakar vd., 2004). Bu nedenle gittikçe artan kutuplaşma ile kapasitans değerlerinin azaldığı ve daha fazla taşıyıcının yapı içine dahil olduğu düşünülmüştür.



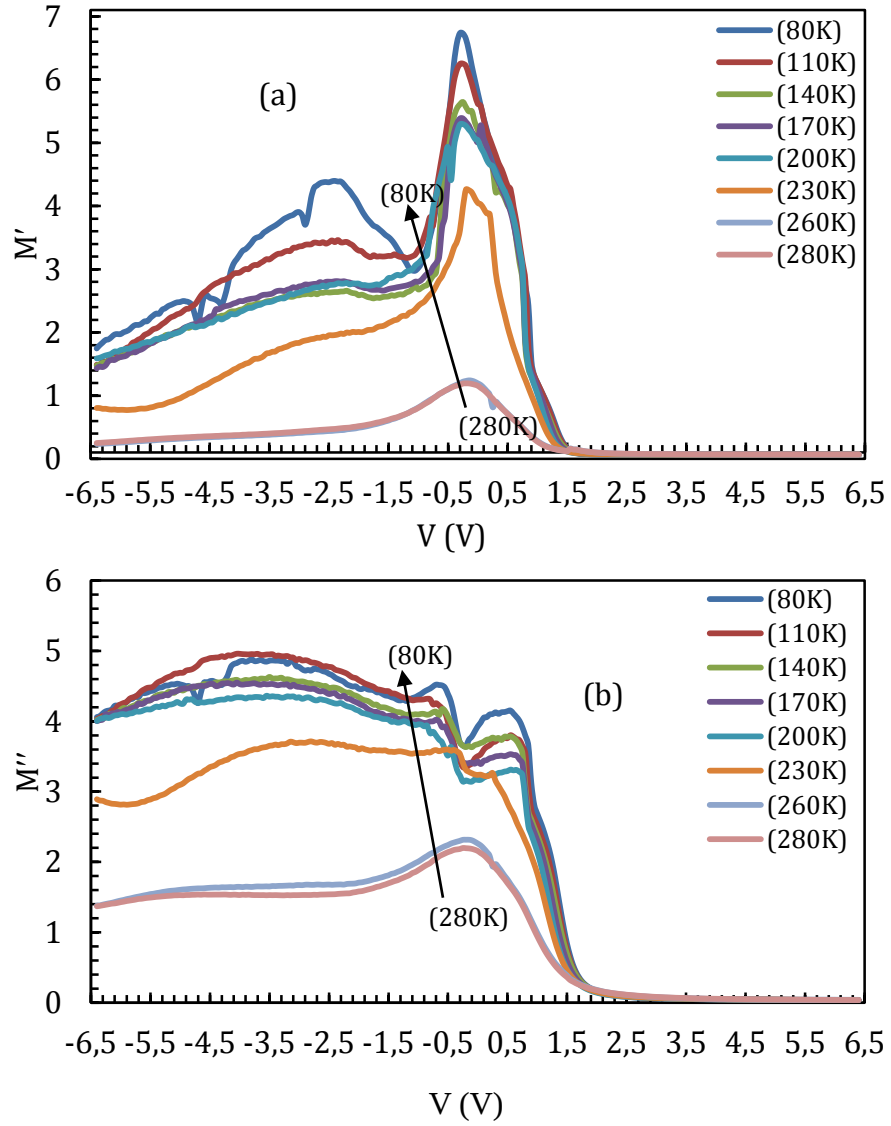
Şekil 5.54. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) (-6.5V-1.5V) voltaj aralığındaki, b) (1.5V-6.5V) voltaj aralığındaki $\tan\delta$ -V karakteristikleri

Herbir sıcaklık değeri için 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au}/\text{Ti}/\text{Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda $\tan\delta$ -V karakteristikleri Şekil 5.54' de görülmektedir. Şekil 5.54 (a) ve (b)' de $\tan\delta$ değerlerinin voltaj geçiş noktasına ulaştığında ($\sim 1.5\text{V}$) ve sonrasında, geçiş noktası ekseninde simetrik bir desen sergilediği görülmüştür.

Şekil 5.54 (a) ve (b)' den $\tan\delta$ değerleri, negatiften pozitif voltaja doğru her bir sıcaklıkta doğrudan azalma eğilimi göstermiştir. Geçiş voltajı değerine ulaşıldıktan sonra ($\sim 1.5\text{V}$) ise artık ϵ' değerlerinin geçiş voltajı değerinden önce

minimum pozitif değerler alması sonucu $\tan\delta$ değerleri de pozitif minimum değerlere ulaşmaya başlamıştır. Geçiş voltajı sonrası ise yüksek doğru beslem voltajlarında tekrar azalma eğilimi göstermiştir. Kompleks admittans ($Y^* = 1/Z^*$) ve kompleks dielektrik modülü (M^*) formalizmi dielektrik malzemelerin analizi için birçok yazar tarafından tartışılmıştır (Prabakar vd., 2003b; Migahed vd., 2004). Bu malzemelerin dielektrik özelliklerini açıklamak için, elektrik modülü, incelenen dielektrik malzemedeki durulma/gevşeme sürecinin varlığını saptamaya izin verdiği için elektrik modülü formalizmi tercih edilmiştir. Ayrıca daha yüksek sıcaklıklarda ara yüzey polarizasyonu iletken bileşen tarafından belirlenemez, dolayısıyla daha yüksek ε' değeri verir. Bu tür zorlukların üstesinden gelebilmek için yani hacim ve yüzey olayını birbirinden ayırabilmek için kompleks dielektrik sabiti/iletkenlik (ε^*) verileri genel olarak kompleks dielektrik modüle (M^*) dönüştürülür (Prabakar vd., 2003a, b; Migahed vd., 2004; Pissis ve Kyritsis, 1997; Shiwakoti vd., 2016). Bu dönüşüm Bölüm 5.4.1' de Eşitlik (5.17a) ve (5.17b)' de sırasıyla kapalı ve açık formda verilmiştir. Kompleks dielektrik modülünün gerçek (M') ve sanal (M'') kısımları Eşitlik (5.17a) ve (5.17b)' den (ε') ve (ε'') kullanılarak 1MHz' de herbir sıcaklık değerinde hesaplanmış ve Şekil 5.55' de 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun için çeşitli sıcaklıklarda M' -V, M'' -V karakteristikleri çizilmiştir.

Grafiklerden de görüleceği gibi özellikle hopping (atlama) mekanizması ve yüzey yük polarizasyonun varlığı nedeniyle M' , M'' özellikle tersinim bölgesinde azalan sıcaklıkla artmıştır. Modülüs spektrumlarının doğası, malzemenin elektrik iletiminde hopping mekanizmasının ve yüzey yük polarizasyonunun varlığını doğrulamıştır (Sarangi vd., 2013; Prabakar vd., 2003a, b).

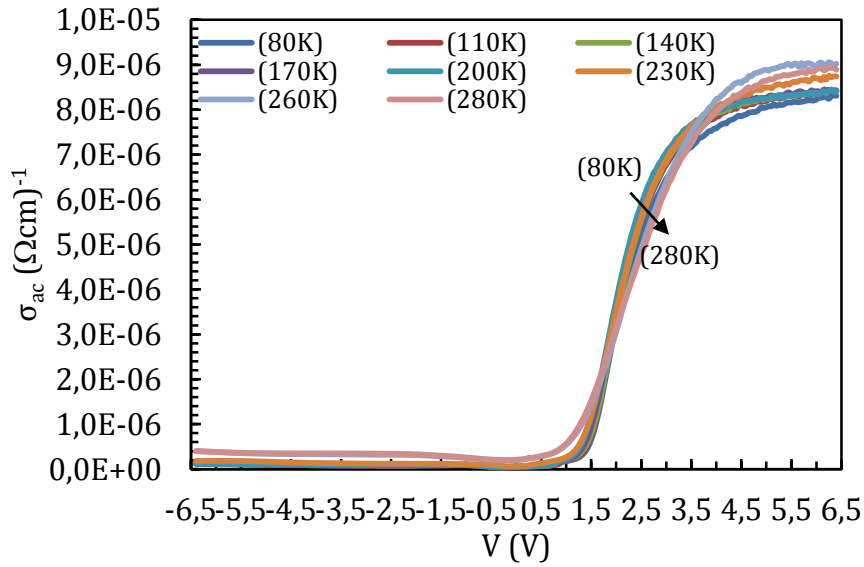


Şekil 5.55. 100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli sıcaklıklarda a) M' -V, b) M'' -V karakteristikleri

M' -V ve M'' -V grafikleri özellikle düşük sıcaklıklarda yaklaşık 0V' da pik değerine sahiptir ve sıcaklık arttıkça zirve değerleri azalma eğilimi göstermiştir. Ayrıca Şekil 5.55' de görüldüğü gibi güçlü yığılım bölgesinde neredeyse sıfıra yaklaşımıştır.

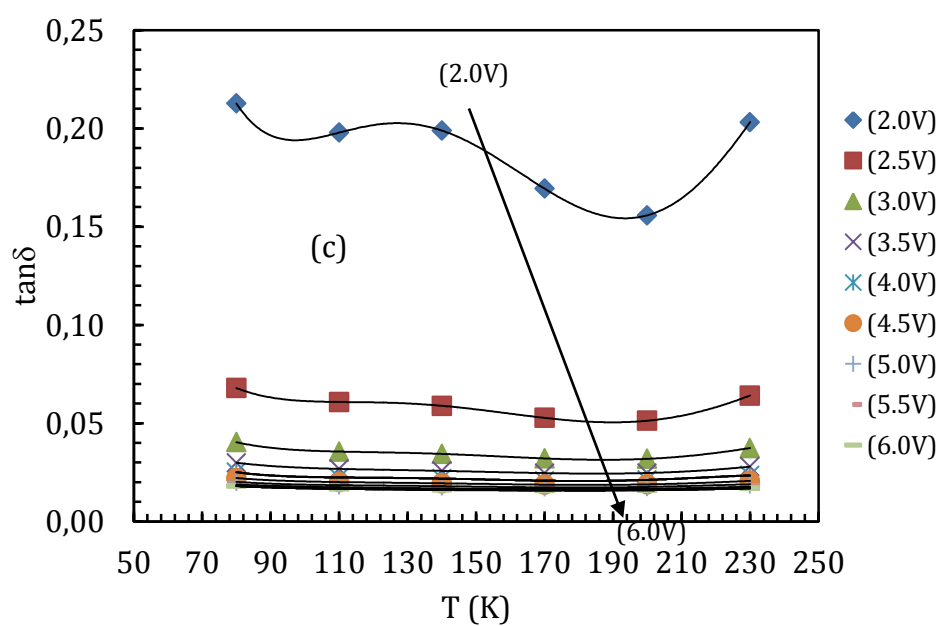
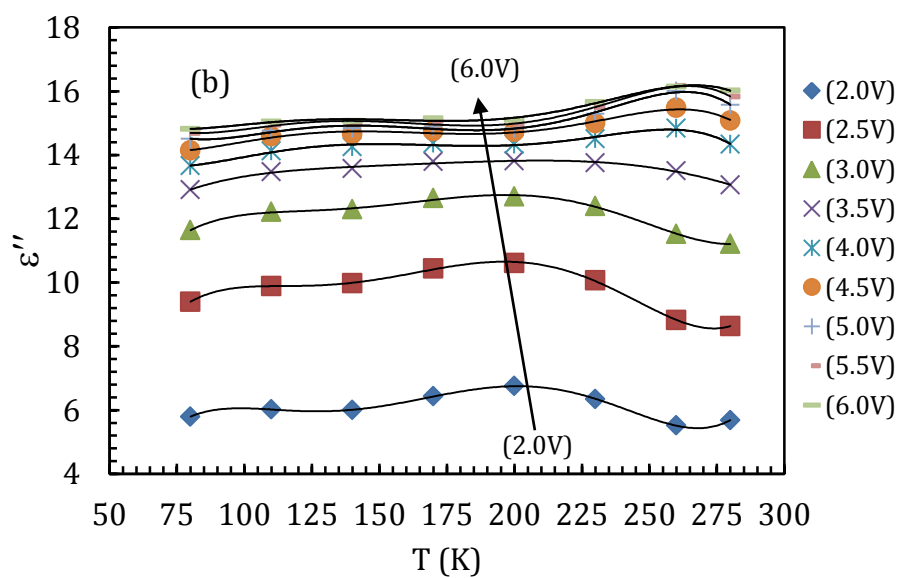
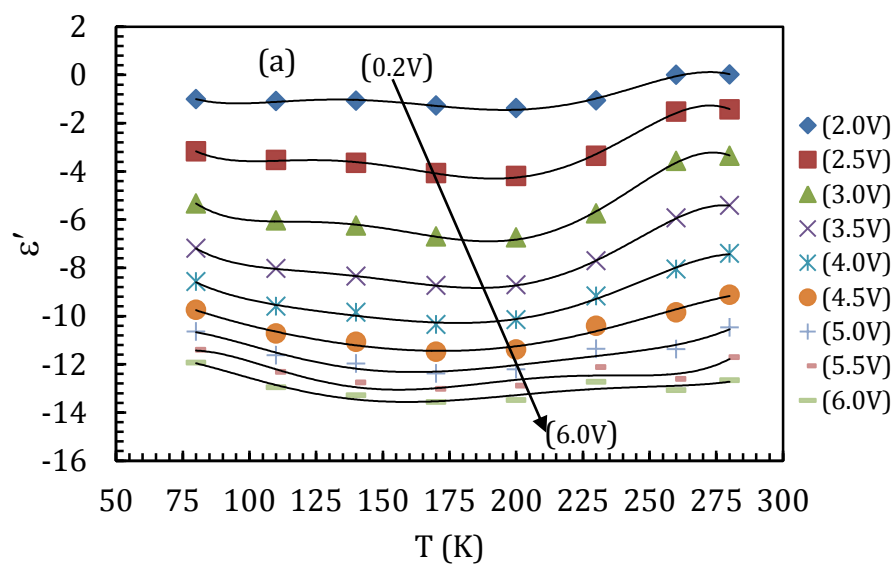
Arayüzey tabakasının ac elektriksel iletkenliği (σ_{ac}) Bölüm 5.3.1' de Eşitlik (5.18) ile verilmişti. σ_{ac} uygulanan gerilim altındaki yük hareketinin bir ölçüsüdür. Şekil 5.56' da görüldüğü gibi MIS σ_{ac} değerleri doğru beslem bölgesinde yüksek değerler alırken özellikle tükenim bölgesinden sonra yüksek doğru beslem bölgesinde doygunluğa ulaşmıştır. Ayrıca, σ_{ac} değerleri sıcaklığın

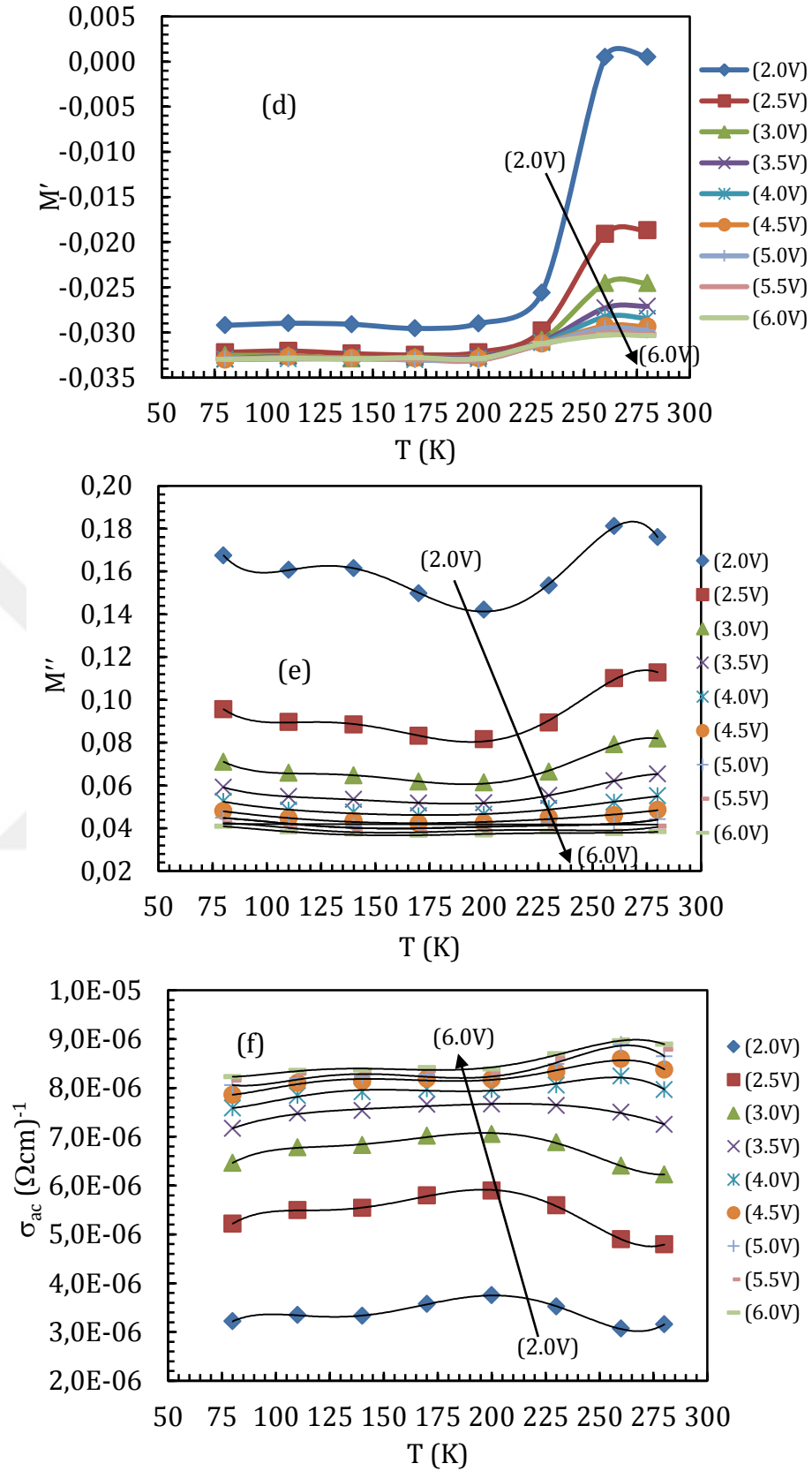
düşmesiyle exponansiyel olarak artar. Bu durum, seri direncin azalmasına atfedilir (Bülbül vd., 2006; Altındal vd., 2003; Yıldız vd., 2008).



Şekil 5.56. 100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz’ de çeşitli sıcaklıklarda σ_{ac} -V karakteristikleri

Şekil 5.56’ da 100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz’ de çeşitli sıcaklıklarda σ_{ac} -V karakteristiklerinde görüldüğü gibi σ_{ac} değerlerinin artan sıcaklıkla üstel olarak arttığı açıktır. Benzer sonuçlar literatürde mevcuttur (Awan ve Gould, 2003; Singh, 1985; Card ve Rhoderick, 1971; Norde, 1979; Crowell ve Sze, 1965; Szatkowski ve Sieranski, 1992; Güçlü vd., 2016b; Yıldız ve Altındal, 2008; Yıldırım vd., 2011; Yücedağ vd., 2015; Saghrouni vd., 2015). Bu durumun MIS yapısındaki dielektrik polarizasyon işleminin iletim sürecine benzer bir mekanizmayla meydana geldiği düşünülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda elektriksel iletkenlikteki artışlar, tane sınırlarındaki safsızlıklar/kirlilikler ve kaymalara atfedilir (Sattar ve Rahman, 2003). Bu kirlilikler, n-tipi yarıiletkenle iletim bandının alt kısmının altında bulunur, dolayısıyla küçük aktivasyon enerjisine sahiptir. İletim mekanizmasına bu katkının esasen yüksek sıcaklıktaki tanelerden kaynaklanan tane sınırlarından ileri geldiği düşünülmektedir. Son zamanlarda anormal pik, indüktif davranış ve MIS ile MPS tipi yapıların NC yada NDC davranışları literatürde bildirilmiştir (Tataroğlu, 2006; Yıldırım vd., 2011; Bilkan vd., 2015; Yerişkin vd., 2016; Baraz vd., 2017).





Şekil 5.57. 100Å Al_2O_3 ara yüzey kalınlıklı $\text{Au/Ti/Al}_2\text{O}_3/n\text{-GaAs}$ MIS tipi Schottky bariyer diyodun 1 MHz' de çeşitli doğru beslem voltajlarında sırasıyla a) ϵ' -T, b) ϵ'' -T, c) $\tan\delta$ -T, d) M' -T, e) M'' -T ve f) σ_{ac} -T karakteristikleri

Her bir C-V-T ve G/ω-V-T datalarıyla gerçek ve sanal dielektrik sabiti, dielektrik kayıp, dielektrik modülüs ve *ac* elektriksel iletkenlik değerlerinin uygulanan farklı voltaj değerleri altındaki dağılımları da incelenmiştir. Bu inceleme sonuçları sırasıyla Şekil 5.57 (a-f)' de çizilmiştir. Şekil 5.57 (a-f)' de görüldüğü gibi dielektrik özellikler ve *ac* elektriksel iletkenliğinin, özellikle yığılma bölgesinde sıcaklık ile gerilim bağımlılığı açıkça gözlenmiştir. Bu durum, ara yüzey durumlarının durulma/gevşeme süresine bağlı olarak sıcaklık etkisi altında yüklerin sayısındaki artışa işaret eder. Şekil 5.57 (a) ve (b)' de gösterildiği gibi ϵ' değerleri voltaj artarken azalmış, ϵ'' değerleri ise tüm sıcaklık aralıklarında artmıştır. ϵ' -V ve ϵ'' -V davranışlarındaki değişiklikler bir diğer nedeni yüzey ve arayüzeydeki tuzak yüklerinin yeniden yapılandırılması ve düzenlenmesidir. Ayrıca Şekil 5.57 (d)' de görüldüğü gibi elektrik modülüsün gerçek kısımlarının (220-280K) sıcaklık aralığında ve her bir uygulama voltajında belirgin bir pik verdiği görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda GaAs bant aralığında metalle yarıiletken ara yüzeyindeki tuzak yüklerinin bu davranışlarından tuzakları boşaltmak için yeterli enerjiye sahip oldukları düşünülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda, yapının bu değerlerinin voltajdan bağımsız olduğu da açıktır (Saghrouni vd., 2015; Symth, 1955; Daniel, 1967; Karataş, 2008; Dixit ve Kumar, 1998).

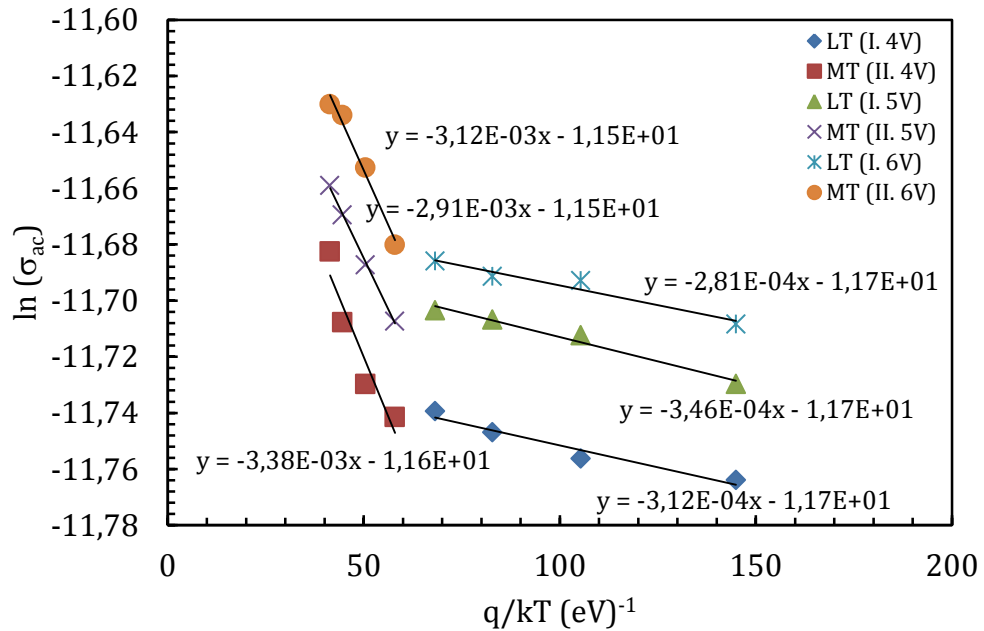
σ_{ac} ile ters mutlak sıcaklık arasındaki ilişki de aşağıdaki denklemle verilmektedir (Awan ve Gould, 2003; Sattar ve Rahman, 2003);

$$\sigma_{ac} = \sigma_0 \exp\left(-\frac{qE_a}{kT}\right) \quad (5.19)$$

Burada σ_0 ön üstel faktör (kompozit sabit), k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve E_a ise tuzak durumlarının görünür aktivasyon enerjisidir (Dixit ve Kumar, 1998).

Şekil 5.58' de 100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diodun düşük ve orta sıcaklık aralığında *ac* elektriksel iletkenliğinin Arrhenius eğrileri ($\ln(\sigma_{ac}) - q/kT$) görülmektedir. Şekil 5.58' de $\ln(\sigma_{ac}) - q/kT$ grafikleri MIS yapısı için farklı eğimli iki lineer bölgeye sahiptir. Bu

davranış düşük (LT) ve orta sıcaklık (MT) bölgelerine karşılık gelen iki farklı iletim mekanizmasının varlığını doğrulamıştır. Örneğin 6V voltaj değerinde farklı eğimli iki lineer bölgeye ait exponansiyel fit için aktivasyon enerjileri sırasıyla; $E_{a1}=3.12\times10^{-3}\text{eV}$ (200-280K) ve $E_{a2}=2.81\times10^{-4}\text{eV}$ (80-170K) bulunmuştur. Düşük sıcaklıklarda iletkenliğin küçük değerleri iletim bandının tabanına yakın olan küçük aktivasyon enerjisine sahip tuzak yüklerine atfedilir. Bununla birlikte yüksek sıcaklıkta iletkenlikteki artış, iletim bandının tabanının çok altında bulunabilen daha yüksek aktivasyon enerjisine sahip tuzak durumlarıyla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 5.58. 100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun düşük ve orta sıcaklık aralığında *a.c.* elektriksel iletkenliğinin Arrhenius eğrileri ($\ln(\sigma_{ac}) - q/kT$)

Çizelge 2. 100Å Al₂O₃ ara yüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyodun ($\ln(\sigma_{ac}) - q/kT$) karakteristiklerinden elde edilen voltaja bağlı σ_0 ve E_a değerleri

	LT (80-170K)		MT (200-280K)	
V (V)	σ_0 (Ωcm) $^{-1}$	E_a (meV)	σ_0 (Ωcm) $^{-1}$	E_a (meV)
4	8.13	0.312	9.63	3.380
5	8.48	0.346	9.74	2.910
6	8.58	0.281	10.20	3.120

Çizelge 5.2' den de görüleceği gibi aktivasyon enerjisi değerleri farklı uygulama gerilimlerinde iki farklı lineer bölge için tablolandırılmıştır. E_a' 'nın düşük değerleri düşük sıcaklıklarda termoiyonik emisyon davranışından daha fazla ayrılmaya neden olan rekombinasyon ile ilişkilendirilmiştir (Tataroğlu ve Altındal, 2008a, b, c; Karataş, 2008). E_a' 'nın bu kadar düşük değerleri, alan yüklerinin varlığına atfedilebilir. İletim elektronları, iyonize oksijen boşluklarının olası bir sonucu olan donör/verici halinden oluşturulabilir. Benzer sonuçlar literatürde mevcuttur (Tataroğlu, 2006; Yıldırım vd., 2011). Yüksek sıcaklık bölgesinde gözlenen daha yüksek aktivasyon enerjisi, yük taşıyıcılarının üretilmesi için gerekli enerjinin toplamı ve boşluktaki hareketinden kaynaklanmıştır (Meena vd., 1993).

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs (MIS) tipi Schottky bariyer diyotlar incelenmiştir. Bu amaçla önce yüksek dielektrikli Al₂O₃ ara yüzey tabakalı Au/n-GaAs yapısı imal edilmiştir. Bunu elde etmek için *n*-tipi GaAs yarıiletkenin ön yüzüne farklı kalınlıklardaki (30Å, 50Å ve 100Å) Al₂O₃ ara yüzey tabakası ALD yöntemi ile oluşturulmuştur. Daha sonra Al₂O₃ ara yüzey tabakası üzerine termal buharlaştırma yoluyla sırasıyla 100Å ve 900Å kalınlıklarında Au/Ti doğrultucu kontaklar yapılmıştır. I-V, C-V ve G/ω-V ölçümleri (1kHz-1MHz) frekans aralığı ile (80-380K) sıcaklık aralığında alınarak gerekli karakteristikler elde edilmiştir. Bu karakteristiklerden elektrik ve dielektrik parametreler hesaplanmıştır. I-V ölçümleriyle yapının akım iletim mekanizmasının belirlenebilmesi amacıyla elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinden akım iletim mekanizmasının termoiyonik emisyon temelli double Gaussian dağılımına uyduğu görülmüş ve gerekli hesaplamalar yapılmıştır. İmal edilen yapıların farklı kalınlıklar için hem belli bir frekans hem de belli bir sıcaklık aralığında; dielektrik sabiti (ϵ'), dielektrik kayıp (ϵ''), kayıp tanjant ($\tan\delta$), elektrik modülü (M^*) gibi dielektrik özellikleri ile *ac* elektriksel iletkenlikleri (σ_{ac}) belirlenmiştir.

Bu çalışmanın ilk amacı, geleneksel SiO₂ yalıtkan tabakası yerine farklı kalınlıklarda yüksek dielektrikli Al₂O₃ ara yüzey tabakalı Au/n-GaAs yapıları imal edildi. Bir sonraki aşamada imal edilen Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS yapılarıdaki akım iletim mekanizmaları belirlendi. Daha sonra C-V karakteristiklerinde ortaya çıkan NC ve NDC mekanizmaları araştırıldı. Son olarak da imal edilen MIS yapının dielektrik özellikleri, elektrik modülü ve *ac* elektriksel iletkenliği geniş sıcaklık (80-380K) ve voltaj ($\pm 5V$) aralığında 1MHz' de C-V ve G/ω-V ölçümlerini içeren admittans spektroskopisi yöntemi kullanılarak belirlendi. Sonuçlar göstermiştir ki, ϵ' , ϵ'' , $\tan\delta$, M' , M'' ve σ_{ac} değerleri ne sadece frekansın ne de sadece voltajın birer fonksiyonudur.

Öncelikle detaylı bir yorum oluşturabilmek için 30Å arayüzey kalınlıklı Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotun akım-iletim

mekanizmaları (CCMs), (80-380K) sıcaklık aralığında I-V ölçümleri yardımıyla elde edilmiştir. Doğru beslem I-V verileriyle Φ_{b0} ve n değerlerinin sıcaklık ve voltaja güçlü bir biçimde bağlı olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar göstermiştir ki; düşük beslem bölgesindeki n değeri 80K' da 19.51 değerinden 380K' da 4.21 değerine azalırken; Φ_{b0} değeri ise aynı sıcaklık aralığında 0.12' den 0.59 eV değerine artmıştır. Benzer şekilde orta beslem bölgesi için bu n değerleri 80K'da 30.73' den 380K' da 4.18 değerine düşerken, Φ_{b0} değerleri aynı sıcaklık aralığında 0.11' den 0.61 eV' ye yükselmiştir. Görüldüğü gibi bariyer yüksekliği ve idealite faktörünün her ikisi de hem sıcaklıktan hem de uygulanan voltajdan etkilenmiştir. $\Phi_{b0}-n$ (Şekil 5.5), $\Phi_{b0}-q/2kT$ (Şekil 5.6), $(n^{-1}-1)-q/2kT$ (Şekil 5.7) ve modifiye Richardson eğrilerinde de iki ayrı lineer bölge oluşmuştur. Bu davranışlar iki ayrı akım-iletim mekanizması olduğunu doğrulamaktadır. Bu iki bölge sırasıyla düşük sıcaklık (80-170K) ve yüksek sıcaklık (200-380K) bölgelerine karşılık gelmiştir. Ayrıca $\bar{\Phi}_{b0}$ ve A^* değerleri sırasıyla düşük beslem bölgesi için ((Şekil 5.8 (a)) 0.39 eV ve 7.07 A/(cmK)² düşük sıcaklık bölgesi için (LTR); 0.92 eV ve 8.158 A/(cmK)² yüksek sıcaklık bölgesi için (HTR) bulunmuştur. Diğer taraftan orta beslem bölgesinde ise bu değerler ((Şekil 4.8 (b)) sırasıyla 0.38eV ve 7.92 A/(cmK)² düşük sıcaklık bölgesinde; 0.94eV ve 4.66 A/(cmK)² yüksek sıcaklık bölgesinde elde edilmiştir. Şekil (5.5), (5.6) ve (5.8)' den açıkça görüldüğü gibi elde edilen $\bar{\Phi}_{b0}$ değerleri birbiriyle uyumlu sonuçlar vermiştir. Elde edilen deneysel A^* değerleri içinden düşük sıcaklık bölgesi için bulunan A^* değeri, n -GaAs için 8.16 A cm⁻²K⁻² teorik değerine de oldukça yakındır.

Geleneksel Richardson grafiğinden $\ln \left(\frac{I_0}{T^2} - q/kT \right)$ çıkarılan A^* değerinin düşük, orta ya da yüksek sıcaklık aralıklarında genellikle teorik değerinden bin veya milyonlarca kat daha küçük olduğu bilinmektedir. Çalışmamızdaki bariyer inhomojenliği nedeniyle RI ve RII için düşük sıcaklıklarda Modifiye Richardson grafiği kullanılarak elde edilen A^* deneysel değerleri sırasıyla 7.07 ve 7.915 A cm⁻²K⁻² olup bu değerler n -GaAs için olan 8.16 A cm⁻²K⁻² teorik değerine çok yakın bulunmuştur. Diğer taraftan yüksek sıcaklıkta RII bölgesi için elde edilen A^* değeri 4.66 A cm⁻²K⁻² olup n -GaAs için teorik değeri olan 8.16 A cm⁻²K⁻²' den 0.57 kat daha düşüktür. Burada, Richardson eğrisinin seçilen lineer bölgesinin

bir veya iki verisinin hatası ya da gürültüsünden kaynaklanabileceği düşünülmüştür. Böylece sadece tek sıcaklık seviyesi veya özellikle grafiğin son verilerindeki hata veya dalgalanma, Richarson grafiğinin kesişiminde bir bozulmaya, dolayısıyla da A^{**} den bir sapmaya neden olabilmektedir.

Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyottaki akım iletiminin sıcaklığa bağlılığı (Au/Ti) ve n-GaAs arasındaki homojen olmayan bariyer yükseklikleri nedeniyle bariyer yüksekliklerinin çift Gaussian dağılımı ile termoiyonik emisyon teorisi kullanılarak başarılı bir biçimde açıklanmıştır.

Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotun frekansa bağlı elektriksel iletkenliği ile dielektrik özellikleri oda sıcaklığında (1kHz-1MHz) frekans ve ($\pm 4V$) voltaj aralığında incelenmiştir. Bu çalışmada arasındaki yüksek dielektrikli yalıtkan arayüzey Al₂O₃ tabakası, metal ile yarıiletken yapının performansını arttırmak için kullanılmıştır. MIS yapısının başlıca elektriksel ve dielektrik parametrelerin tükenim ve yığılma bölgelerindeki dağılımı özellikle arayüzey polarizasyonu ve arayüzey tuzaklarına işaret etmiştir. Deneysel sonuçların analizinden doğru beslem ϵ' , ϵ'' ve $\tan\delta$ değerlerinin her bir gerilim için artan frekansla dik bir düşüş sergilediği σ_{ac}' nin ise arttığı görülmüştür. Düşük frekanslarda ϵ' ve ϵ'' 'nin yüksek değerleri Maxwell-Wagner ve uzay yük polarizasyonuna atfedilmiştir. ϵ'' 'nin büyük değerleri Al₂O₃ arayüzey tabakası ve elektron etkilerine atfedilebilir. Öte yandan ϵ'' 'nin büyük değerlerinin de materyal içindeki serbest yük taşıyıcılarının hareketinden kaynaklandığı görülmüştür. Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotlar iyi dielektrik özellikleriyle yüksek frekanslı transformatörler ve yüksek dielektrik kapasitörler gibi olası uygulamalarda önerilmiştir. Ayrıca M' ve M'' özellikle tükenim bölgesinde uygulanan gerilimin kuvvetli birer fonksiyonudur. Arayüzey tuzak yüklerinin katkısı nedeniyle M' ve M'' değerleri azalan frekans ile belirgin bir pik ve büyüklük artışı vermiştir. $M'-V$ ve $M''-V$ grafiklerinin bu davranışları uygulanan gerilimden ziyade frekansa duyarlı dielektrik gevşeme mekanizmalarıyla açıklamıştır.

Bu çalışma farklı kalınlıktaki Al_2O_3 ara yüzey tabakasının GaAs yarıiletkenin ön yüzüne ALD yöntemiyle başarılı bir biçimde biriktirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotun başlıca elektriksel ve dielektrik karakteristikleri birçok ilave ölçüm ile birlikte $I(V,T)$, $C(V,T)$ ve $G/\omega(V,T)$ karakteristikleriyle desteklenmiştir. MIS yapısının C-V-T ve G/ω -V-T eğrileri 200-380K gibi geniş bir sıcaklık ile 1MHz' de ($\pm 5V$) voltaj aralığında incelenmiştir. Sonuçlar C ve G/ω değerlerinin sıcaklığa ve voltaja oldukça duyarlı olduğunu göstermiştir. Yığılım bölgesindeki toplam kapasitans değerleri sıcaklık artarken, tersinim ve tükenim bölgesindeki artan kapasitans değerlerine zıt olarak azalmıştır. Ayrıca ileri doğru beslem C-V grafikleri ($\sim 1.5V$)' da bir kesişme noktası göstererek negatif değerlere doğru gitmiştir. Ayrıca R_s değerinin sıcaklıkla artışının sebebi, özellikle düşük sıcaklıklarda serbest yük eksikliğinden kaynaklanmıştır. Bu durum tükenim bölgesi kapasitansının seri bileşimine ve sıcaklığa bağlı arayüzey tuzaklarının kapasitans katkısına atfedilmiştir. Güçlü yığılım bölgesinde C değerleri maksimum G/ω değerleriyle birlikte minimuma doğru iner. Kapasitans ile iletkenlik özelliklerindeki artışlar, negatif kapasitanstaki azalma, MIS yapısındaki kutuplaşma sürecinde fazla taşıyıcılardaki artışlar ile açıklanmıştır. Negatif kapasitans fenomenini daha somut olarak göstermek için voltajı sabit tutup sıcaklığı değiştirerek C-I ve G/ω -I grafikleri elde edilmiştir. Bu çizimlerden sıcaklığın doğru beslem bölgesinde arttığı durumda kapasitansın negatif değerleri azalmaktadır. Negatif kapasitansın büyük değerleri R_s , N_{ss} ve Al_2O_3 ara yüzeyinin varlığından kaynaklanmıştır. Doğru beslem bölgesinde C' nin artan sıcaklıkla azalması dolayısıyla NC' nin de azalışı iletkenliğin yükselmesine karşılık gelmiştir. Sonuçta doğru beslem C-V grafiğinde anormal piklerin varlığı ve sıcaklık etkileri arayüzeyin üzerinde gerçekleşecek yük iletimlerinin bir sonucudur. Au/Ti/ Al_2O_3 /n-GaAs MIS tipi Schottky bariyer diyotun gözlenen NC davranışı yüzey durumları, diyodun seri direnci ve iyonizasyon süreçleri ile açıklanmıştır. Bu sebeplerden dolayı ölçülen yüksek frekanslı C-V ve G/ω -V grafikleri, R_s etkileri eklenerek düzeltilmelidir.

Sıcaklığa bağlı negatif dielektrik sabitinin kökeni ve yığılım bölgesindeki ϵ' -V grafikleri, R_s , N_{ss} ve yüksek dielektrikli Al_2O_3 ara yüzey tabakası, 1MHz' de C-V-

T ve G/ω -V-T kullanılarak ve atlama (hopping) mekanizmaları göz önünde bulundurularak incelenmiştir. Doğru beslem ε' -V grafikleri arasındaki kesişme davranışları özellikle düşük sıcaklıklarda serbest yük eksikliğine bağlanmıştır. Deneysel sonuçlar ε' , ε'' , $\tan\delta$, M' , M'' ve σ_{ac} değerlerinin özellikle tükenim ve yığılma bölgesinde uygulanan voltaja ve sıcaklığa bağlı olduğunu göstermiştir. ε'' nün negatif değerleri artan sıcaklıkla Al_2O_3 ve GaAs arasındaki ara yüzey yüklerinin kaybı yani iyonizasyon süreçlerinin etkisi nedeniyle ε''' nün azalışına karşılık gelmiştir. Parametrelerdeki bu tür davranış, arayüzey durum/tuzak yüklerinin yeniden yapılandırılması ve düzenlenmesi ve orta sıcaklıklarda arayüzey polarizasyonundaki artışla açıklanmıştır. NC'nin diğer bir nedeni metal-dielektrik arayüzeyindeki bariyer yüksekliğinde bir düşüşe bağlı olabilmektedir. Arrhenius grafikleri $\ln(\sigma_{ac})-q/kT$, farklı voltaj değerlerinde düşük ve orta sıcaklığa karşılık gelen farklı eğimli iki lineer bölgeye sahiptir.

$\Phi_{bo}-n$ ve $(\ln(\frac{I_0}{T^2}) - \frac{q^2\sigma_0^2}{2k^2T^2})-q/kT$ grafiklerinin I ve II. bölgeler için farklı eğimli iki lineer bölge sergilemesi hazırlanan diyodun doğru beslem I-V-T özelliklerinin diğer mekanizmaların yanı sıra M/S arayüzeyindeki engellerin TE tabanlı çift GD ile daha başarılı açıklanabileceğini göstermiştir. Diğer yönden C-V ve G/ω -V grafikleri ile C ve G verileri kullanılarak elde edilen dielektrik parametrelerin hem frekans hem de voltaja oldukça bağlı oluşu M/S arayüzeyinde çok sayıda arayüzey durumunun mevcudiyetine ve yüzey polarizasyonuna atfedilmiştir. Gerek MS gerekse MIS tipi Schottky bariyer diyotlardaki akım-iletim mekanizmaları farklı pek çok parametreye bağlı olabilmektedir. Bunlar, yarıiletken kristalin temizleme işlemleri, M/S arayüzeyinde meydana gelen engelin homojensizliği, yarıiletkenin yasak enerji aralığındaki safızlıklar/bozukluklar (dislocations)/arayüzeylerin yoğunluğu, M/S arayüzeyinde doğal ya da yapay oluşturulan yalıtkan arayüzey kalınlığı, diyodun seri ve kısa devre dirençleri (R_s , R_{sh}), numune sıcaklığı ve dışarıdan uygulanan voltajdır. MS veya MIS tipi Schottky bariyer diyotlarda yukarıda detaylı anlatıldığı gibi muhtemel akım iletim mekanizmaları ve M/S arayüzeyinde oluşan engelin biçimi I-V-T karakteristiklerinden belirlenirken özellikle oda sıcaklığı ve altındaki sıcaklıklarda daha karmaşık bir durum

sergileyebilmektedir. Benzer olarak arayüzey durumları/tuzakları ve yüzey polarizasyonunun özellikle düşük ve orta frekanslarda oldukça etkin olmasından dolayı temel diyot parametrelerinden Fermi enerjisi, katkı atomlarının yoğunluğu ve engel yüksekliği gibi temel diyot parametrelerinin yeterince yüksek frekanslarda alınması elde edilen sonuçların doğruluğu ve güvenilirliğini arttırmaktadır.

Bu deneysel çalışma sonuçları bize metal ile yarıiletken arasında Al_2O_3 arayüzey tabakası ve buna benzer yüksek dielektrik sabitli malzemelerin kullanımının geleneksel SiO_2 yalıtkan tabakasına birer alternatif olabileceğini ve bu alternatifin birçok avantaj sağlayabileceğini göstermiştir. İleride yapılabilir benzer çalışmalar için öneri ve görüşlerimiz ise sırasıyla şöyle özetlenebilir;

Hazırlanan diyotların temel diyot parametreleri geniş sıcaklık ve voltaj aralığında incelenmeli ve özellikle engel homojensizliği ile R_s , R_{sh} , N_{ss} değerleri hesaplamalarda dikkate alınmalıdır. Yine elde edilen sonuçlar doğrultusunda herhangi bir yarıiletken aygıtta muhtemel akım iletim mekanizmaları ile metal-yarıiletken arasındaki engelin biçimini belirlemek için hem I-V hem de C-V karakteristiklerinin de özellikle geniş bir sıcaklık, voltaj ve frekans aralığında incelenmesi önerilir. Diğer bir önemli öneri ise MS veya MIS tipi Schottky engel diyotlar hazırlanırken performanslarını arttırmak için özellikle düşük dirençli bir ohmik kontak sağlanması uygundur. M/S arayüzeyinde oluşan istenmeyen yüzey durumlarını azaltmak için ya tavlama işlemi yapılmalı ya da yüksek dielektrikli malzeme kullanmaya özen gösterilmelidir. Tüm elektriksel ölçümler yeterince geniş sıcaklık, frekans ve voltaj aralığında gerçekleştirilerek özellikle daha düşük sıcaklıklarda etkin olabilecek akım-iletim mekanizmaları belirlenmelidir. Yine tüm elektriksel ölçümler zamana bağlı olmalı ve hem ölçümlerin tekrarlanabilirliği hem de elektrik ve dielektriksel parametrelerin zamana bağlı değişimi incelenmelidir. Ayrıca MS yapılar da geleneksel oksit tabakalar yerine son zamanlardaki çalışmalarda da sık tercih edilen yüksek dielektrik sabitli saf veya katkılı polimerlerin kullanılması gibi daha ucuz ve kolay büyütülebilecek malzemeler de tercih edilebilir. M/S arayüzeyinde oluşturulan organik/polimer malzemeler değişik oranlarda Zn, Co, Ni gibi

materyaller ya da grafen ile katkılamak suretiyle daha yüksek dielektrikli bir arayüzey tabaka oluşturularak bir taraftan MPS tipi diyotlarda doğrultma oranıyla kısa devre direncini artırılıp diğer taraftan R_s , N_{ss} ve kaçak akım azaltılabilir.

Tüm fabrikasyon aşamaları mümkün olduğu kadar temiz bir ortamda gerçekleştirilmelidir. Elektriksel ölçümlere geçilmeden önce diğer yapısal ve benzeri analizlerin mümkün olduğunca kısa sürede yapılmasında fayda görülmektedir. Hazırlanan aygıtlar hakkında daha kapsamlı bilgi edinebilmek amacıyla radyasyona karşı olan tepkileri –örneğin görünür bölge, x ve gamma ışınlarına karşı- belirlenebilir. Sıcaklığa bağlı karakteristiklerin belirlenmesinde gürültü ve ışık gibi dış etkileri azamiye indirebilmek için tüm ölçümler mümkünse vakumlanabilen kapalı bir ortam içinde gerçekleştirilmelidir. Sıcaklık, frekans ve voltaj ölçümlerinin mümkün olduğunca sık aralıklarla (step) gerçekleştirilmesi elde edilen sonuçların güvenilirliğini önemli ölçüde arttıracaktır.

Atomik katman kaplama tekniği ile oluşturduğumuz nano ölçekli Al_2O_3 ara katmanlara sahip yarıiletken malzeme temelli numunelerimiz için kullandığımız ALD tekniği çalışmamızın ön plana çıkan özelliğidir. Çünkü ALD tekniğinin son yılların en popüler ince film büyütme tekniklerinden biri olduğu yapılan araştırmalarca kanıtlanmıştır. Ara katman oluşturulurken her bir döngü tam olarak eşit miktar malzemeyi biriktirebildiğinden dolayı ALD çok avantajlı, birçok tekniğe göre daha güvenilir ve kontrollüdür. Kapsamlı içeriği ile elinizdeki bu tez çalışmasının literatür çalışmalarında eksik gördüğümüz bu alandaki yayınlara katkı sağlayacağını umuyoruz.

Son olarak yüksek dielektrik sabitli Al_2O_3 ara yüzey tabaka kullanarak imal ettiğimiz MIS yapının; basınç, radyasyon veya aydınlanmaya karşı olan tepkileri belirlenerek sensör uygulamalarında kullanılıp kullanılamayacağı çalışmanın devamı niteliğinde önerilebilir.

KAYNAKLAR

- Afandiyeva, I.M., Bülbül, M.M., Altındal, Ş., Bengi, S., 2012. Frequency Dependent Dielectrical Properties and Electrical Conductivity of Platinum silicide/Si Contact Structures with Diffusion Barrier. *Microelectronic Engineering*, 93, 50-55.
- Afandiyeva, I.M., Demirezen, S., and Altındal, Ş., 2013. Temperature Dependence of Forward and Reverse Bias Current-Voltage Characteristics in Al-TiW-PtSi/*n*-Si Schottky Barrier Diodes with the Amorphous Diffusion Barrier. *Journal of Alloys and Compounds*, 552, 423-429.
- Akkal, B., Benemara, Z., Boudissa, A., Bouiadjra, N.B., Amrani, M., Bideux, L., Gruzza, B., 1998. Modelization and Characterization of Au/InSb/InP Schottky Systems as a Function of Temperature. *Materials Science and Engineering B*, 55(3), 162-168.
- Aldemir, D.A., 2007. Al₂P₂ClAn(C₂H₅(COOH))/*p*-Si/Al Yapılarda Akım-Voltaj ve Kapasite-Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 52s, Isparta.
- Aldemir, D.A., 2013. Metal/III-V Yarıiletken *n*-GaAs Metal Doğrultucu Kontakların Numune Sıcaklığına Bağlı Diyot Karakteristiklerinin Bazı Metotlarla İrdelenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 101s, Isparta.
- Alialy, S., 2015. Au/TiO₂/*n*-4H-SiC (MIS) Diyotlarda Muhtemel Akım-İletim Mekanizmalarının Geniş Bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü 90s, Ankara.
- Alialy, S., Altındal, Ş., Tanrıkulu, E.E., Yıldız, D.E., 2014. Analysis of Temperature Dependent Current-Conduction Mechanisms in Au/TiO₂/*n*-4H-SiC (Metal/Insulator/Semiconductor) Type Schottky Barrier Diodes. *Journal of Applied Physics*, 116(8), 083709.
- Altındal, Ş., Dökme, İ., Bülbül, M.M., Yalçın, N., Serin, T., 2006. The Role of the Interface Insulator Layer and Interface States on the Current-Transport Mechanism of Schottky Diodes in Wide Temperature Range. *Microelectronic Engineering*, 83(3), 499-505.
- Altındal, Ş., Kanbur, H., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A., 2008a. On the Energy Distribution of Interface States and Their Relaxation Time and Capture Cross Section Profiles in Al/SiO₂/*p*-Si (MIS) Schottky Diodes. *Microelectronic Engineering*, 85(7), 1495-1501.
- Altındal, Ş., Karadeniz, S. Tuğluoğlu, N., Tataroğlu, A., 2003. The Role of Interface States and Series Resistance of the I-V and C-V Characteristics in Al/SnO₂/*p*-Si Schottky Diodes. *Solid State Electronics*, 47(10), 1847-1854.

- Altındal, Ş., Parlaktürk, F., Tataroğlu, A., Parlak, M., Sarmasov, S.N., Agasiev, A.A., 2008b. The Temperature Profile and Bias Dependent Series Resistance of Au/Bi₄Ti₃O₁₂/SiO₂/n-Si (MFIS) Structures. *Vacuum*, 82(11), 1246-1250.
- Altındal, Ş., Tataroğlu, A., Dökme, İ., 2005. Density of Interface States Excess Capacitance and Series Resistance in the Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 85(3), 345-358.
- Altındal, Ş., Uslu, H., 2011. The Origin of Anomalous Peak and Negative Capacitance in the Forward Bias C-V Characteristics of Au/PVA/n-Si Structures. *Journal of Applied Physics*, 109, 074503.
- Altındal, Ş., Yücedağ, İ., Tataroğlu, A., 2009. Analysis of Surface States and Series Resistance in Au/n-Si Schottky Diodes with Insulator Layer Using Current-Voltage and Admittance-Voltage Characteristics. *Vacuum*, 84(3), 363-368.
- Altuntaş, H., Altındal, Ş., Shtrikman, H., Özçelik, S., 2009. A Detailed Study of Current-Voltage Characteristics in Au/SiO₂/n-GaAs in Wide Temperature Range. *Microelectronics Reliability*, 49(8), 904-911.
- Ambrico, M., Losurdo, M., Capezzuto, P., Btuno, G., Ligonzo, T., Schiavulli, L., Farella, I. and Augelli, V., 2005. A Study of Remote Plasma Nitrided n-GaAs/Au Schottky Barrier. *Solid State Electronics*, 49(3), 413-419.
- Arehart, A.R., Allerman, A.A., Ringle, S.A., 2011. Electrical Characterization of n-type Al_{0.30}Ga_{0.70}N Schottky Diodes. *Journal of Applied Physics*, 109(11), 114506.
- Arslan, E., Altındal, Ş., Özçelik, S., Özbay, E., 2009. Dislocation-Governed Current-Transport Mechanism in (Ni/Au)-AlGaN/AlN/GaN Heterostructures. *Journal of Applied Physics*, 105, 1-7, 023705.
- Arslan, E., Bütün, S., Şafak, Y., Uslu, H., Taşcıoğlu, İ., Altındal, Ş., Özbay, E., 2011. Electrical Characterization of MS and MIS Structures on AlGaN/AlN/GaN Heterostructures. *Microelectronics Reliability*, 51(2), 370-375.
- Arslan, E., Şafak, Y., Altındal, Ş., Kelekçi, Ö., Özbay, E., 2010. Temperature Dependent Negative Capacitance Behavior in (Ni/Au)/AlGaN/AlN/GaN Heterostructures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 356(20-22), 1006-1011.
- Ataseven, T., 2011. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 5-33s, Ankara.
- Awan, S.A., Gould, R.D., 2003. Conductivity and Dielectric Properties of Silicon Nitride Thin Films Prepared by RF Magnetron Sputtering Using Nitrogen gas. *Thin Solid Films*, 423, 267-272.

- Aydoğan, Ş., 2003. Polimer/İnorganik Yarıiletken Kontakların Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı I-V (Akım-Voltaj), C-V (Kapasite-Voltaj) ve C-f (Kapasite-Frekans) Ölçümlerinden Tayin Edilmesi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 117s, Erzurum.
- Ayyıldız, E., Türüt, A., Efeoğlu, H., Tüzemen, S., Sağlam, M., Yoğurtçu, Y.K., 1996. Effect of Series Resistance on the Forward Current-Voltage Characteristics of Schottky Diodes in the Presence of Interfacial Layer. Solid-State Electronics 39(1), 83-87.
- Azizian-Kalandaragh, Y., Aydemir, U., Altındal, Ş., 2014. Dielectric and Optical Properties of CdS-Polimer Nanocomposites Prepared by the Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction (SILAR) Method. Journal of Electronic Materials, 43(4), 1226-1231.
- Baraz, N., Yücedağ, İ., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş., 2017. Determining Electrical and Dielectric Parameters of Dependence as Function of Frequencies in Al/ZnS-PVA/p-Si (MPS) Structures, Journal of Material Science: Materials in Electronics, 28, DOI 10. 1007/s10854-016-5662-3, 1315-1321.
- Bardeen, J., 1947. Surface States and Rectification at a Metal-Semiconductor Contact. Physics Review, 71, 717.
- Barış, B., 2014. Ac Conductivity and Dielectric Spectroscopy Studies on Tin Oxide Thin Films Formed by Spray Deposition Technique. Physica B, 438(1), 53-59.
- Batı, B., 1998. İdeal ve İdeal Olmayan Ohmik ve Doğrultucu Kontaktlı Au/n-Si Schottky Diyotlarda Doğru Beslem Kapasite-Voltaj-Frekans Karakteristikleri. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 120s, Erzurum.
- Batı, B., Nuhuğlu, C., Sağlam, M., Ayyıldız, E., Türüt, A., 2000. On the Forward Bias Excess Capacitance at the Intimate and MIS Schottky Barrier Diodes with Perfect or Perfect Ohmic Back Contact. Physica Scripta, 61, 209.
- Bengi, A., Altındal, Ş., Özçelik, S., Agaliyeva, S.T., Mammadov, T.S., 2008. Analysis of Temperature Dependent Electrical Characteristics of Au/n-GaAs/GaAs Structures in a Wide Temperature Range. Vacuum, 83(2), 276-281.
- Bengi, A., Altındal, Ş., Özçelik, S., Mamadov, T.S., 2007. Gaussian Distribution of Inhomogeneous Barrier Height in Al_{0.24}Ga_{0.76}As/GaAs Structures. Physica B:Condensed Matter, 396(1-2), 22-28.
- Bengi, S., 2013. Al/HfO₂/p-Si Yapının Elektriksel ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 136s, Ankara.

- Berger, L.I., 1997. Semiconductor Materials. CRC Press, 145-152, New York.
- Bethe, H.A., 1942. Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers. MIT Radiation Laboratory Report, 43, 12.
- Bilkan, Ç., 2013. Perilensiz ve Perilenli Al/*p*-Si Schottky Engel Diyotların Elektriksel iletkenliklerinin Oda Sıcaklığında Karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 91s, Ankara.
- Bilkan, Ç., 2016. Polimer Ara Yüzey Tabakalı ve Tabakasız Schottky Engel Diyotların Elektriksel Karakteristiklerinin Karşılaştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 91s, Ankara.
- Bilkan, Ç., Gümüş, A., Altındal, Ş., 2015. The Source of Negative Capacitance and Anomalous Peak in the Forward Bias Capacitance-Voltage in Cr/*p*-Si Schottky Barrier Diodes (SBDs). Materials Science in Semiconductor Processing, 39, 484-491.
- Bohlin, K.E., 1986. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. Journal of Applied Physics, 60(3), 1223-1224.
- Braun, F., 1875. Über Die Stromleitung Durch Schwefelmetalle. Annalen der Physik, 229(12), 556-563.
- Busch, G., 1989. Early History of the Physics and Chemistry of Semiconductors-from Doubts to Fact in a Hundred Years. European Journal of Physics, 10(4), 254-263.
- Bülbül, M.M., Bengi, S., Dökme, İ., Altındal, Ş., Tunç, T., 2010. Temperature Dependent Capacitance and Conductance-Voltage Characteristics of Au/polyvinyl alcohol (Co, Zn)/*n*-Si Schottky Diodes. Journal of Applied. Physics, 108(3), 034517.
- Bülbül, M.M., Zeyrek, S., Altındal, Ş., Yüzer, H., 2006. On the Profile of Temperature Dependent Series Resistance in Al/Si₃N₄/*p*-Si (MIS) Schottky diodes. Microelectronic Engineering, 83(3), 577-581.
- Card, H.C., Rhoderick, E.H., 1971. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes. Journal of Physics D, 4(10), 1589-1601.
- Champness, C.H., Clark, W.R., 1990. Anomalous Inductive Effect in Selenium Schottky Diodes. Applied. Physics Letters, 56(12), 1104.
- Chand, S., Kumar, J., 1996. Evidence for the Double Distribution of Barrier Heights in Pd₂Si/*n*-Si Schottky Diodes from I-V-T Measurements. Semiconductor Science and Technology, 11(8), 1203.
- Chang, C. Y., Sze, S.M., 1970. Carrier Transport Across Metal-Semiconductor Barriers. Solid-State Electronics, 13,(6), 727-740.

- Chattopadhyay, P., RayChaudhuri, B., 1992. Origin of the Anomalous Peak in the Forward Capacitance-Voltage plot of a Schottky Barrier diode. *Solid State Electronics*, 35(6), 875-878.
- Chattopadhyay, P., RayChaudhuri, B., 1993. Frequency Dependence of Forward Capacitance-Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes. *Solid State Electronics*, 36(4), 605-610.
- Chelkowski, A., 1980. *Dielectric Physics*. Elsevier, 97-105, Amsterdam.
- Cheng, H.E., Tian, D.C., Huang, K.C., 2012. Properties of SnO₂ Films Grown by Atomic Layer Deposition. *Procedia Engineering*, 36, 510-515.
- Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics. *Applied Physics Letters*, 49(2), 85-87.
- Colinge, C.P., Colinge, C.A., 2002. *Physics of Semiconductor Devices*. Springer, 431p, USA.
- Cova, P., Singh, A., 1990. Temperature Dependence of I-V and C-V Characteristics of Ni/*n*-CdF₂ Schottky Barrier Type Diodes. *Solid-State Electronics*, 33(1), 11-19.
- Cova, P., Singh, A., Masut, R.A., 1997. A Self-Consistent Technique for the Analysis of the Temperature Dependence of Current-Voltage and Capacitance-Voltage Characteristics of a Tunnel Metal-Insulator-Semiconductor Structure. *Journal of Applied Physics* 82(10), 5217-5226.
- Cowley, A.M., Sze, S.M., 1965. Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 3212-3221.
- Crowell, C.R., 1977. The Physical Significance of the T₀ Anomalies in Schottky Barriers. *Solid-State Electronics*, 20(3), 171-175.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1966. Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers. *Solid State Electronics*, 9(11-12), 1035-1048.
- Crowell, C.V., Rideout, V.L., 1969. Normalized Thermionic-Field Emission in Metal-Semiconductor Barriers. *Solid-State Electronics*, 12(2), 89-105.
- Çakar, M., Temirci, C., Türüt, A., 2004. The Schottky Barrier Height of the Rectifying Cu/pyronine-B/*p*-Si, Au/pyronine-B/*p*-Si, Sn/pyronine-B/*p*-Si and Al/pyronine-B/*p*-Si contacts. *Synthetic Metals*, 142(1-3), 177-180.

- Çakıcı, T., Güzeldir, B., Sağlam, M., 2015. Temperature Dependent of Electrical Characteristics of Au/*n*-GaAs/In Schottky Diode with In₂S₃ Interfacial Layer Obtained by Using Spray Pyrolysis Method. *Journal of Alloys Compounds*, 646, 954–965.
- Çavdar, Ş., Koralay, H., Altındal, Ş., 2011. Effect of Vanadium Substitution on the Dielectric Properties of Glass Ceramic Bi-2212 Superconductor, *Journal of Low. Temperature Physics*, 164(1-2), 102-114.
- Çetinkaya, H.G., 2015. Au/(%1 Grafen katkılı)-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/*n*-Si Schottky Engel Diyotların Hazırlanması ve Elektrik ile Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi., Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 93s, Ankara.
- Çetinkaya, H.G., Alialy, S., Altındal, Ş., Kaya, A., Uslu, İ., 2015. Investigation of Negative Dielectric Constant in Au/1% Graphene (GP) Doped-Ca_{1.9}Pr_{0.1}Co₄O_x/*n*-Si Structures at Forward Biases Using Impedance Spectroscopy Analysis. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 26(5), 3186-3195.
- Çetinkaya, H.G., Yıldız, D.E., Altındal, Ş., 2014. On the Negative Capacitance Behavior in the Forward Bias of Au/*n*-4H-SiC (MS) and Comparison Between MS and Au/TiO₂/*n*-4H-SiC (MIS) Type Diodes Both in Dark and Under 200 W Illumination Intensity. *International Journal of Modern Physics B (IJMPB)*, 28(1), 1450237.
- Daniel, Vera V., 1967. Dielectric Relaxation. Academic Press, 1-19, 79-87, London.
- Davydov, B., 1939. *Journal of Physics USSR*, 1. 167
- Davydov, B., 1941. *Journal of Physics USSR*, 4, 335.
- Demircioğlu, Ö., . Karataş, Ş., Yıldırım, N., Bakkaloğlu, Ö.F., Türüt, A., 2011. Temperature Dependent Current-Voltage and Capacitance- Voltage Characteristics of Chromium Schottky Contacts Formed by Electrodeposition Technique on *n*-type Si. *Journal of. Alloys and Compounds*, 509(22), 6433-6439.
- Demirezen, S., 2013. Frequency and Voltage-Dependent Dielectric Properties and Electrical Conductivity of of Au/PVA (Bi-doped)/*n*-Si Schottky Barrier Diodes at Room Temperature. *Applied Physics A*, 112(4), 827-833.
- Demirezen, S., Altındal, Ş., 2010. Possible Current-Transport Mechanisms in the (Ni/Au)/Al_{0.22}Ga_{0.78}N/AlN/GaN Schottky Barrier Diodes at the Wide Temperature Range. *Current Applied Physics*, 10(4), 1188-1195.

- Demirezen, S., Altındal, Ş., Uslu, İ., 2013. Two Diodes Model and Illumination Effect on the Forward and Reverse Bias I-V and C-V Characteristics of Au/PVA (Bi-doped)/n-Si Photodiode at Room Temperature. *Current Applied Physics*, 13(1), 53-59.
- Dhakal, T., Nandur, A.S., Christian, R., Vasekar, P., Desu, S., Westgate, C., Koukis, D.I., Arenas, D.J., Tanner, D.B., 2012. Transmittance From Visible to Mid Infrared in AZO Films Grown by Atomic Layer Deposition System. *Solar Energy*, 86(5), 1306-1312.
- Dimitrijević, S., 2012. *Principles of Semiconductor Devices*. Oxford University Press, Oxford.
- Dixit, M., Kumar, A., 1998. Effect of Photocrystallization on the Photoconductivity of a-Se₆₅Te₂₀Sb₁₅. *Physica B*, 252, 286-294.
- Dökme, İ., 2011. The Analysis of I-V Characteristics of Schottky Diodes by Thermionic Emission with a Gaussian Distribution of Barrier Height. *Microelectronics Reliability*, 51(2), 360-364.
- Dökme, İ., Altındal, Ş., 2011. Comparative Analysis of Temperature-Dependent Electrical and Dielectrical Properties of an Al-TiW-Pd₂Si/n-Si Schottky Devices at Two Frequency, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 58(11), 4042-4048.
- Dökme, İ., Altındal, Ş., 2012. The Effect of Gamma Irradiation on Electrical and Dielectrical Properties of Al-TiW-Pd₂Si/n-Si Schottky Diode at Room Temperature. *Current Applied Physics*, 12(3), 860-864.
- Dökme, İ., Altındal, Ş., Tunç, T., Uslu, İ., 2010. Temperature Dependent Electrical and Dielectric Properties of Au/polyvinyl alcohol (Ni, Zn-doped)/n-Si Schottky Diodes. *Microelectronics Reliability*, 50(1), 39-44.
- Dökme, İ., Yıldız, D.E., Altındal, Ş., 2012. Illumination Intensity Effect on the Dielectric Properties of Schottky Devices with Co, Ni-doped PVA Nanofibers as an Interfacial Layer, *Advanced in Polymer Technology*, 31(1), 63-70.
- Eroğlu, A., Tataroğlu, A., Altındal, Ş., 2012. On the Temperature Dependent Dielectric Properties Conductivity and Resistivity of MIS Structures at 1 MHz. *Microelectronic Engineering*, 91, 154-158.
- Ershov, M., Liu, H.C., Li, L., Buchanan, M., Wasilewski, Z.R., Jonscher, A.K. 1998. Negative Capacitance Effect in Semiconductor Devices. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45, 2196-2206.
- Eskier U., 2017. Al₂O₃ Genel Özellikleri. Erişim tarihi: 14.08.2017/<http://www.makaleler.com>hobi>

- Ewing, D.J., Portter, L.M., Wahab, Q., Ma, X., Sudarshan, T., Tumakha, S., Gao, M., Brillson, L.J., 2007. Inhomogeneities in Ni/4H-SiC Schottky Barriers: Localized Fermi-Level Pinning by Defect States. *Journal of Applied Physics*, 101(11), 114514.
- Fan, J.B., Liu, H.X., Fei, C.X., Ma, F., Fan, X. J., Hao, Y., 2013. Evidence of GeO Volatilization and Its Effect on the Characteristics of HfO₂ Grown on a Ge Substrate. *Chinese Physics B*, 22(3), 087702.
- Fanggao, C., Saunders, G.A., Lampson, E.F., Hampton, R.N., Carini, G., Marco, G.D., Lanza, M. 1996. *Journal of Polymer Science Polymer. Physics*, 34, 425.
- Farag, A.A.M., Gündüz, B., Yakuphanoglu, F. and Farooq, W.A., 2010. Controlling of Electrical Characteristics of Al/*p*-Si Schottky Diode by Tris (8-hydroxyquinolino) Aluminum Organic Film. *Synthetic Metals*, 160(23-24), 2559-2563.
- Frankl, D.R., 1961. Some Effects of Material Parameters on the Design of Surface Space-Charge Varactors, *Solid State Electronics*, 2, 71-76.
- Fröhlich, H., 1958. *Theory of Dielectrics*. Clarendon Press, 1-21, 70-78, Oxford.
- Gharbi, R., Abdelkrim, M., Fathallah, M., Tresso, E., Ferrero, S., Pirri, C. F., Brahim, T. M., 2006. Observation of Negative Capacitance in a-SiC:H/a-Si:H UV Photodetectors. *Solid State Electronics*, 50(3), 367-371.
- Goetzberger, A., Klausmann, E., Schultz, M.J., 1976. Interface States on Semiconductor/Insulator Surfaces. *CRC Critical Reviews in Solid State Sciences*. 6(1), 226-233.
- Gökçen, M., Altuntaş, H., Altındal, Ş. Özçelik, S., 2012a. Frequency and Voltage Dependence of Negative Capacitance in Au/SiO₂/*n*-type GaAs Structures. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 15, 41-46.
- Gökçen, M., Tunç, T., Altındal, Ş., Uslu, İ., 2012b. The Effect of PVA (Bi₂O₃-doped) Interfacial Layer and Series Resistance on Electrical Characteristics of Au/*n*-Si (110) Schottky Barrier Diodes (SBDs). *Current Applied Physics*, 12(2), 525-530.
- Gökçen, M., Yıldırım, M., 2012. Investigation of Inhomogeneous Barrier Height of Au/Bi₄Ti₃O₁₂/*n*-Si Structure Through Gaussian Distribution of Barrier Height. *Chinese Physics B*, 21(12), 128502.
- Grondhal, L. O., 1926a. *Physical Review and Modern Physics*, 5, 141.
- Grondhal, L. O., 1926b. *Physical Review*, 27, 813.

- Grove, A.S., Deal, B.E., Snow, E.H., Sah, C.T., 1965. Investigation of Thermally Oxidized Silicon Surfaces Metal-Oxide-Semiconductor Structures. *Solid-State Electronics*, 8(2), 145-163.
- Gupta, M., Leong, E.W.V., 2008. *Microwaves and Metals*. John Wiley&Sons 256s, Singapore.
- Güçlü, Ç.Ş., Özdemir, A.F., Altındal, Ş., 2016a. Double Exponential I-V Characteristics and Double Gaussian Distribution of Barrier Heights in (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs (MIS)-type Schottky Barrier Diodes in Wide Temperature Range, *Applied Physics A*, 22, 1032, doi: 10.1007/s00339-016-0558-x
- Güçlü, Ç.Ş., Özdemir, A.F., Kökce A., Altındal, Ş., 2016b. Frequency and Voltage-Dependent Dielectric Properties and *a.c.* Electrical Conductivity of (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs with Thin Al₂O₃ Interfacial Layer at Room Temperature, *Acta Physica Polonica A*, 130(1), 325-330. doi: 10.12693/AphysPolA.129.325
- Güllü, Ö., 2008. H₂ Ön Tavlama Au/n-GaAs Diyotlarda Elektriksel Karakteristiklerin Schottky Metal Kalınlığı ve Sıcaklığa Bağlı Değişiminin İncelenmesi., Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 127s, Erzurum.
- Güllü, Ö., Biber, M., Van Meirhaeghe, R.L., Türüt, A., 2008. Effects of the Barrier Metal Thickness and Hydrogen Pre-annealing on the Characteristics Parameters of Au/n-GaAs Metal-Semiconductor Schottky Contacts. *Thin Solid Films*, 516(21), 7851-7856.
- Gülnahar, M., 2015. Electrical Characteristics of an Ag/n-InP Schottky Diode Based on Temperature Dependent Current-Voltage and Capacitance-Voltage Measurements. *Metallurgical and Materials. Transactions A*, 46(9), 3960-3971.
- Hackam, R., Harrop, P., 1972. Electrical Properties of Nickel-Low-Doped n-Type Gallium Arsenide Schottky-Barrier Diodes. *IEEE Xplore Transactions on Electron Devices*, 19(12), 1231-1238.
- Hahn, B.R., Yoon, D.Y., 1989. Electrical and Interfacial Properties of Metal-Polyamide-Silicon Structure. *Journal of Applied Physics*, 65(7), 2766-2771.
- Hill, A., Coleman, C.C., 1980. A Single-Frequency Approximation for Interface-State Density Determination. *Solid State Electronics*, 23(9), 987-993.
- Ho, P.S., Yang, E.S., Evans, H.L., Wu, X., 1986. Electronic States at Silicide-Silicon Interfaces. *Physical Review Letters*, 56, 177.
- Ho, P.S., Yang, E.S., Evans, H.L., Wu, X., 1988. *Physics Letters*, 60, 53.

- Hofstein, S.R., Warfield, G., 1965. Physical Limitations on the Frequency Response of a Semiconductor Surface Inversion Layer. *Solid State Electronics*, 8(3), 321-341.
- Hoque, M.M., Dutta, A., Kumar, S., Sinha, T.P., 2014. Dielectric Relaxation and Conductivity of $\text{Ba}(\text{Mg}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$ and $\text{Ba}(\text{Zn}_{1/3}\text{Ta}_{2/3})\text{O}_3$. *Journals of Material Science and Technology*, 30(4), 311-320.
- Horvarth, Zs.J., 1996. Comment on Analysis of I-V Measurements on CrSi_2 -Si Schottky Structures in a Wide Temperature range. *Solid-states Electronics*, 39(1), 176-178.
- Horvath, Z.J., 1988. Domination of the Thermionic-Field Emission in the Reverse I-V Characteristics of *n*-type GaAs Schottky Contacts. *Journal of Applied Physics*, 64(12), 6780-6784.
- Horvath, Z., Rakovics, V., Stentpali, B., Püsköpi, S., Zdansky, K., 2003. InP Schottky Junctions for Zero Bias Detector Diodes. *ScienceDirect, Vacuum* 71(1-2), 113-116.
- Huang, L., Wang, D., 2015. *Journal of Applied Physics*, 117(1-5), 204503.
- Hudait, M.K., Krupanidhi, S.B., 2001. Doping Dependence of the Barrier Height and Ideality Factor of Au/*n*-GaAs Schottky Diodes at Low Temperatures. *Physica B: Condensed Matter* 307(1-4), 125-137.
- Hudait, M.K., Venkateswarlu, P., Krupanidhi, S.B., 2001. Electrical Transport Characteristics of Au/*n*-GaAs Schottky Diodes on *n*-Ge at Low Temperatures. *Solid States Electronics*, 45(1), 133-141.
- Ishaque, K., Salam, Z., Taheri, H., Shamsudin, A., 2011. A Critical Evaluation of EA Computational Methods for Photovoltaic Cell Parameter Extraction Based on Two Diode Model. *Solar Energy*, 85(9), 1768-1779.
- Jandarhanam, V., Kumar, A.A., Reddy, V.R., Reddy, P.N., 2009. Study of Current-Voltage-Temperature (I-V-T) and Capacitance-Voltage-Temperature (C-V-T) Characteristics of Molybdenum Schottky Contacts on *n*-InP (100). *Journal of Alloys and Compounds*, 485, 467-472.
- Jones, B.K., Santana, J., McPherson, M., 1998. Negative Capacitance Effects in Semiconductor Diodes. *Solid State Communications*, 107(2), 47-50.
- Kahng, D., Atalla, M.M., 1960. Silicon-Silicon Diode Field Induced Surface Devices, IRE-AIEE Solid State Devices Research Conference, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, PA.
- Kampen, T.U., Park, S., Zahn, D.R.T., 2002. Barrier Height Engineering of Ag/GaAs (100) Schottky Contacts by a Thin Organic Interlayer. *Applied Surface Science*, 190(1-4), 461-466.

- Kanbur, H., Altındal, Ş., Tataroğlu, A., 2005. The Effect of Interface States, Excess Capacitance and Series Resistance in the Al/SiO₂/p-Si Schottky Diodes. *Applied Surface Science*, 252(5), 1732-1738.
- Karabulut, A. 2014. Atomik Katman Kaplama Tekniği ile Sentezlenen Nano-Ölçekli Al₂O₃ Ara Katmanlı Yarıiletken Malzeme Temelli Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 165s, Erzurum.
- Karataş, Ş., 2008. Studies on Electrical and the Dielectric Properties in MS Structures. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 354, 3606-3611.
- Karataş, Ş., Altındal, Ş., 2005. Analysis of I-V Characteristics on Au/n-GaAs Schottky Structures in Wide Temperature Range. *Materials Science and Engineering B*, 122(2), 133-139.
- Kassis, A., Saad, M., 2010. Analysis of Multi-Crystalline Silicon Solar Cells at Low Illumination Levels Using a Modified Two-Diode Model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 94(12), 2108-2112.
- Kaya, A. 2013. Metal-Polimer-Yarıiletken (MPS) yapıların Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Geniş Frekans Aralığında incelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 110s, Ankara.
- Kaya, A., Alialy, S., Demirezen, S., Balbaşı, M., Yerişkin, S.A., Aytimur, A., 2016. The Investigation of Dielectric Properties and *a.c.* Conductivity of Au/GO-Doped PrBaCoO Nanoceramic/n-Si Capacitors Using Impedance Spectroscopy method. *Ceramics International*, 42(2), 3322-3329.
- Kaya, A., Altındal, Ş., Asar, Y.Ş., Sönmez, Z., 2013. On the Voltage and Frequency Distribution of Dielectric Properties and *a.c.* Electrical Conductivity in Al/SiO₂/p-Si (MOS) Capacitors. *Chinese Physics Letter*, 30(1), 017301.
- Kaya, A., Vural Ö., Tecimer, H., Demirezen, S., Altındal Ş., 2014. Frequency and Voltage Dependence of Dielectric Properties and Electric modulus in Au/PVC+TCNQ/p-Si Structure at Room Temperature. *Current Applied Physics*, 14(3), 322-330.
- Kenney, C., Saraswat, K.C., Taylor, B., Majhi, P., 2011. Thermionic Field Emission Explanation for Nonlinear Richardson Plots. *IEEE Transactions Electron Devices*, 58(8), 2423-2429.
- Khomenkova, L., Portier, X., Cardin, J., Gourbilleau, F., 2010. Thermal Stability of high-*k* Si-Rich HfO₂ Layers Grown by RF Magnetron Sputtering, *Nanotechnology* 21(28), 285707.
- Konofaos, N., McClean I.P., Thomas, C.B., 1997. Characterization of the Interface States Between Amorphous Diamond-Like Carbon Films and (100) Silicon. *Physica Status Solidi (a)*, 161, 111-123.

- Korkut, H., Yıldırım, N., Türüt, A., 2009. Thermal Annealing Effects on I-V-T Characteristics of Sputtered Cr/*n*-GaAs Diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 404(1), 4039–4044.
- Korucu, D., Efeoğlu, H., Türüt, A., Altındal, Ş., 2012. Evaluation of Lateral Barrier Height of Inhomogeneous Photolithography-Fabricated Au/*n*-GaAs Schottky Barrier Diodes from 80 K to 320 K. *Material Science in Semiconductor Processing* 15(5), 480–485.
- Korucu, D., Ertekin E., Belenli, İ., Altındal, Ş., 2013a. Frequency and Voltage Dependence of Dielectric Loss of MgB₂ Composites at Different Temperatures. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 26(6), 2165-2170.
- Korucu, D., Türüt, A., Altındal, Ş., 2013b. The Origin of Negative Capacitance in Au/*n*-GaAs Schottky Barrier Diodes (SBDs) Prepared by Photolithography Technique in the Wide Frequency Range. *Current Applied Physics*, 13(6), 1101-1108.
- Kumar Reddy, N.N.K., Rajagopal Reddy, V., 2011. Barrier Characteristics of Pt/Ru Schottky Contacts on *n*-type GaN Based on I-V-T and C-V-T Measurements. *Bulletin of Materials Science*. 35(1), 53–61.
- Janardhanam, V., Ashok Kumar, A., Rajagopal, Reddy, V., Narasimha Reddy, P., 2009. Study of Current-Voltage-Temperature (I-V-T) and Capacitance-Voltage-Temperature (C-V-T) Characteristics of Molybdenum Schottky Contacts on *n*-InP (100). *Journal of Alloys and Compounds*, 45, 467-472.
- Laeri, F., Schüth, F., Simon, U., Wark, M., (Editors) 2003. Host-guest-systems based on nanoporous Crystals (145, 160, 436), 650s, Wiley, Weinheim/Germany.
- Laurent, M.A., Gupta, G., Suntrup III, D.J., DenBaars, S.P., 2016. Barrier Height Inhomogeneity and Its Impact on (Al, In, Ga) N Schottky Diodes. *Journal of Applied Physics*, 119(6), 064501.
- Lee, K.Y., Lee, W.C., Huang, M.L., Chang, C.H., Lee, Y.J., Chiu, Y.K., Wu, T.B., Hong, M., Kwo, R., 2007. A Novel Approach of Using a MBE Template for ALD Growth of high-*k* Dielectrics, *Journal of Crystal Growth*, 301-302, 378-380.
- Lehovec, K., Slobodskoy, A. L., Sprague, J. L. 1963. Field Effect-Capacitance Analysis of Surface States on Silicon. *Physica Status Solidi b*, 3(3), 447-464.
- Le-Huu, M., Schmitt, H., Noll, S., Grieb, M., Schrey, F.F., Bauer, A.J., Frey, L., Ryssell, H., 2011. Investigation of the Reliability of 4H-SiC MOS Devices for High Temperature Applications. *Microelectronics Reliability*,. 51(8), 1346-1350.

- Leroy, W.P., Opsomer, K., Forment, S., Van Meirhaneghe, R.L., 2005. The Barrier Height Inhomogeneity in Identically Prepared Au/*n*-GaAs Schottky Barrier Diodes. *Solid-State Electronics*, 49(6), 878-883.
- Li, J., Tang, A., Li, X., Cao, Y., Wang, M., Ning, Y., Lv, L., Lu, Q., Lu, Y., Hu, Y., Hou, Y. and Teng, F., 2014. Negative Differential Resistance and Carrier Transport of Electrically Bistable Devices Based on poly (N-vinylcarbazole)-Silver Sulfide Composites. *Nanoscale Research Letters*, 9(1), 128-132.
- Ligenza, J.R., Spitzer, W.G., 1960. The Mechanism for Silicon Oxidation in Steam and Oxygen, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 14, 131-136.
- Lin Y.J., Zeng, J.J., Chang, H.C., 2015. Temperature-Dependent Electrical Properties for Graphene Schottky Contact on *n*-type Si With and Without Sulfide Treatment. *Applied Physics A*, 118(1), 353–359.
- Lin, S. D., Ilchenko, V.V., Marin, V.V., Panarin, K.Y., Buyanin A.A., Tretyak, O.V., 2008. Frequency Dependence of Negative Differential Capacitance in Schottky Diodes with InAs Quantum Dots. *Applied Physics Letters*, 93, 103103.
- Lindner, R., 1962. Semiconductor Surface Varactor. *Bell Labs Technical Journal* 41(3), 803-831.
- Long, R.D., McIntyre, P., 2012. Surface Preparation and Deposited Gate Oxides for Gallium Nitride Based Metal Oxide Semiconductor Devices. *Materials*, 5(7), 1297-1335.
- M'Peko, J.C., 1997. Effect of Negative Capacitances on High-Temperature Dielectric Measurements at Relatively Low Frequency. *Applied Physics Letters*, 71, 3730.
- Macedo, P.B., Moynihan, C.T., Bose, R., 1972. Role of Ionic Diffusion in Polarization in Vitreous Ionic Conductor. *Physics and Chemistry of Glasses*, 13, 171-179.
- Maril, E., Kaya, A., Çetinkaya, H.G., Koçyiğit, S., Altındal, Ş., 2015. On the Temperature Dependent Forward-Bias Current–Voltage (I–V) Characteristic in Au/2% Graphene-Cobalt Doped (Ca₃Co₄Ga_{0.001}O_x)/*n*-Si Structure. *Material Science in Semiconductor Processing*, 39, 332–338.
- Mayimele, M.A., Rensburg, J.P.J., Auret, F.D., Diale, M., 2016. Analysis of Temperature-Dependent Current–Voltage Characteristics and Extraction of Series Resistance in Pd/ZnO Schottky Barrier Diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 480, 58–62.

- McDaniel, D.D., Posadas, A., Ngo, T.Q., Smith, D.J., Demkov, A.A., Ekerdt, J.G., 2013. Epitaxial Strontium Titanate Films Grown by Atomic Layer Deposition on SrTiO₃-Buffered Si(001) Substrates. *Journal of Vacuum Science&Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 31(1), 01A136.
- Meena, P., Balasubramanian, C., Narayandass, Sa. K., Mangalaraj, D., 1993. Conduction Studies on Europium Oxide Thin Films. *Physica Status Solidi (a)*, 135, 207-214.
- Migahed, M.D., Ishra, M., Fahmy, T., Barakat, A., 2004. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65(6), 1121-1125.
- Moll, J.L., 1959. Variable Capacitance with Large Capacity Change. *IRE Wescon Convention Record*, 3, 32-36.
- Mott, N.F., 1938. Note on the Contact Between a Metal and an Insulator or Semiconductor. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34(4), 568-572.
- Mott, N.F., Gurney, R.W., 1948. *Electronic Processes in Ionic Crystals*, Clarendon Press, Second edition 172p , Oxford.
- Mönch, W., 1999. Barrier Heights of Real Schottky Contacts Explained by Metal-Induced Gap States and Lateral Inhomogeneities. *Journal of Vacuum Science. and Technology B, Technology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurements, and Phenomena*, 17(39), 1867.
- Neamen, D.A., 1997. *Semiconductor Physics and Devices* 2nd ed., Mc Graw-Hill, 730p, New York.
- Nicollian, E.H., Brews, J.R., 1982. *Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology*, John Willey&Sons, 250p, New York,
- Nicollian, E.H., Goetzberger, A., 1965. MOS Conductance Technique for Measuring Surface State Parameters. *Applied Physics Letters*, 7, 216.
- Nicollian, E. H., Goetzberger, A., 1967. The Si-SiO₂ Interface-Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. *Bell Labs Technical Journal*, 46(6), 1055-1133.
- Nicollian, E., H., Brews, J.R., 1982. *MOS Physics and Technology*, Wiley, 255p, New York.
- Norde, H., 1979. A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes With High Series Resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053.
- Northrop, D.C., Rhoderick, E.H., 1978. The Physics of Schottky Barriers in Impedance Devices. *Solid State Electron*, 4, 37-73.

- Ohdomari, I., Tu, K., 1980. Parallel Silicide Contacts. Journal of Applied Physics, 51(7), 3735-3739.
- Ohshita, Y., Ogura, A., Hoshina, A., Hiroy, S., Suzuki, T., Machida, H., 2002. Using Tetrakis-Diethylamido-Hafnium for HfO₂ Thin-Film Growth in Low-Pressure Chemical Vapor Deposition. Thin Solid Films, 406(1-2), 215-218.
- Oral, M., 1983. Elektrostatik. Ege Üniversitesi Matbaası, 221-252, İzmir.
- Osvald, J., 1999. Numerical Study of Electrical Transport in Inhomogeneous Schottky Diodes. Journal of Applied Physics, 85(3), 1935.
- Ouennoghi, Z., Sellai, A., 1997. MIS Tunnel Admittance With an Inhomogeneous Dielectric. International Journal Electronics, 83(5), 571-580.
- Ouennoughi, Z., 1997. On the Minimum in the Forward Capacitance in MIS Tunnel Diodes. Physica Status Solidi (a), 160(1), 127.
- Özavcı, E., 2014. Au/*n*-GaAs Schottky Diyotların Hazırlanması ve Akım İletim Mekanizmalarının Geniş bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 82s, Ankara.
- Özavcı, E., Demirezen, S., Aydemir, U., Altındal, Ş., 2013. A Detailed Study on Current-Voltage Characteristics of Au/*n*-GaAs in Wide Temperature Range. Sensors and Actuators A, 194, 259-268.
- Özdemir, A. F., 2002. Metal/*n*-GaAs Schottky Diyotlarında Havada Oksitlenme ve Yaşlanmanın Akım-Gerilim (I-V) ve Kapasite, Kondüktans-Gerilim, Frekans (C,V-G,f) Karakteristiklerine Etkisi. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 82s, Isparta.
- Özdemir, A.F., Aydın, S.G., Aldemir, D.A., Gürsoy, S.S., 2011. Electrical and Optical Properties of *p*-type Silicon Based on Polypyrrole-Derivative Polymer. Synthetic. Metals, 161(9-10), 692-697.
- Özdemir, A.F., Türüt, A., Kökce, A., 2006. The Double Gaussian Distribution of Barrier Heights in Au/*n*-GaAs Schottky Diodes from I-V-T Characteristics. Semiconductor Science and Technology, 21(3), 298-302.
- Özerli, H., Karteri, İ., Karataş, Ş., Altındal, Ş., 2014. The Current Voltage and Capacitance-Voltage Characteristics at High Temperatures of Au Schottky Contact to *n* type GaAs. Materials Research Bulletin, 53, 211-217.
- Padovani, F.A., 1971. The Voltage-Current Characteristics of Metal-Semiconductor Contacts in Semiconductors and Semimetals. Academic Press, 7, 75-146, New York.
- Padovani, F.A., Stratton, R., 1966. Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers. Solid-State Electronics, 9, 695-707.

- Padovani, F.A., Sumner, G.G., 1965. Experimental Study of Gold-Gallium Arsenide Schottky Barriers. *Journal of Applied Physics*, 36(12), 3744-3747.
- Pakma, O., Serin, N., Serin, T., Altındal, Ş., 2008. The Double Gaussian Distribution of Barrier Heights in Al/TiO₂/p-Si (Metal-Insulator-Semiconductor) Structures at Low Temperatures. *Journal of Applied Physics*, 104(1-6), 014501.
- Pakma, O., Serin, N., Serin, T., Altındal, Ş., 2008. The Influence of Series Resistance and Interface States on Intersecting Behavior of I-V Characteristics of Al/TiO₂/p-Si (MIS) Structures at Low Temperatures, *Semiconductor Science and Technology*, 23(1-9), 105014.
- Pakma, O., Tozlu, C., Kavasoğlu, N., Kavasoğlu, A.S., Özden, S., 2011. I-V-T Analyzing Inhomogeneous Au/Poly (4-vinyl phenol)/p-Si Structure with a Double Gaussian Distribution of Barrier Heights. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 58(1), 244-250.
- Parish, G., Kennedy, R.A., Umana-Membreno, G.A., Nener, B.D., 2008. Localised Defect-Induced Schottky Barrier Lowering in n-GaN Schottky Diodes. *Solid-State Electronics*, 52(2), 171.
- Perera, A.G.U., Shen, W.Z., Ershov, M., Liu, H.C., Buchanan, M., Schaff, W.J., 1999. Negative Capacitance of GaAs Homo Junction Far-Infrared Detectors. *Applied Physics Letters*, 74, 3167.
- Perlin, J., 2002. *From Space to Earth: The Story of Solar Electricity*. Cambridge, Harvard University Press, 223p, Michigan, USA.
- Pfann, W.G. and Garrett, C.G.B., 1959. Semiconductor Varactor Using Space-Charge Layers. *Proceedings of the IRE*, 47, 2011.
- Pissis, P., Kyritsis, A., 1997. Electrical Conductivity Studies in Hydrogels. *Solid State Ionics*, 97(1-4), 105-113.
- Popescu, M., Bunget, I., 1984. *Physics of Solid Dielectrics*, Elsevier, 206-245, 282-291, Amsterdam.
- Prabakar, K., Narayandass, S.K., Mangalaraj, D., 2003a. Dielectric Properties of Cd_{0.6}Zn_{0.4}Te Thin Films. *Physica Status Solidi (a)*, 199, 507.
- Prabakar, K., Narayandass, S.K., Mangalaraj, D., 2003b. Dielectric and Electric Modulus Properties of Vacuum Evaporated Cd_{0.8}Zn_{0.2} Thin Films. *Materials Science and Engineering: B*, 98(3), 225-231.
- Prasanna Lakshmi, B., Siva Pratap Reddy, M., Ashok Kumar, A., Rajagopal Reddy, V., 2012. Electrical Transport Properties of Au/SiO₂/n-GaN MIS Structure in a Wide Temperature Range. *Current Applied Physics*, 12(3), 765-772.

- Rajagopal Reddy, V., Janardhanam, V., Leem, C.H., Choi, C.J., 2014. Electrical Properties and the Double Gaussian Distribution of Inhomogeneous Barrier Heights in Se/*n*-GaN Schottky Barrier Diode. *Superlattices and Microstructures*, 67, 242–255.
- Rajagopal Reddy, V., Nanda Kumar Reddy, N., 2012. Current Transport Mechanisms in Ru/Pd/*n*-GaN Schottky Barrier Diodes and Deep Level Defect Studies. *Superlattices and Microstructures*, 52(3), 484-499.
- Reddy, D.S., Reddy, M.S.P. and Reddy, V.R., 2011a. Analysis of Current-Voltage-Temperature (I-V-T) and Capacitance-Voltage-Temperature (C-V-T) Characteristics of Pt/Ti Schottky Contacts on *n*-type InP. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 5(3-4), 448-454.
- Reddy, M.S.P., Ashok Kumar, A., Rajagopal Reddy, V., 2011b. Electrical Transport Characteristics of Ni/Pd/*n*-GaN Schottky Barrier Diodes as a Function of Temperature. *Thin Solid Films* 519(11), 3844–3850.
- Reddy, M.S.P., Kang, H.S., Lee, J.H., Rajagopal Reddy, V., Jang, J.S., 2014. Electrical Properties and the Role of Inhomogeneities at the Polyvinyl Alcohol/*n*-InP Schottky Barrier Interface. *Journal of Applied Polymer Science*, 131, (1-10), 39773.
- Reddy, V.R., Manjunath, V., Janardhanam, V., Leem C.H., Choi C.J., 2015. Double Gaussian Distribution of Barrier Height, Interface States, and Current Transport Mechanisms in Au/Bi_{0.5}Na_{0.5}TiO₃-BaTiO₃/*n*-GaN MIS Structure. *Journal of Electronic Materials*, 44(1), 549–557.
- Rhoderick, E.H., Williams, R.H., 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford Press, 252s, Oxford.
- Rideout, V.L., Crowell, C.V., 1970. Effects of Image Force and Tunneling on Current-Transport in Metal-Semiconductor (Schottky Barrier) Contacts. *Solid-State Electronics*, 13(7), 727-740.
- Roberts, A.R.V., Evans, D.A., 2005. Modification of GaAs Schottky Diodes by Thin Organic Interlayers. *Applied Physics Letters*, 86(7), 072105.
- Rossi, R.C., Lewis, N.S., 2001. Investigation of the Size-Scaling Behavior of Spatially Nonuniform Barrier Height Contacts to Semiconductor Surfaces Using Ordered Nanometer-Scale Nickel Arrays on Silicon Electrodes. *Journal of Physical Chemistry B*, 105(49), 12303-12318.
- Round, H.J., 1907. A Note on Carborundum. *Electrical World*, 19, 309.
- Saad, M., Kassis, A., 2003. Analysis of Illumination-Intensity-Dependent J-V Characteristics of ZnO/CdS/CuGaSe₂ Single Crystal Solar Cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 77(4), 415-422.

- Saghrouni, H., Jomni, S., Belgacem, W., Elghoul, N., Beji, L., 2015. Temperature Dependent Electrical and Dielectrical Properties of a metal/Dy₂O₃/n-GaAs (MOS) Structure. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 29, 307-314.
- Sah, C.T., Noyce, R.N., Shockley, W., 1957. Carrier Generation and Recombination in *pn* Junctions and *pn* Junction Characteristics. *Browse Journals and Magazine, Proceedings of the IRE*, 45(9), 1228-1243.
- Sarangi, S., Badapanda, T., Behera, B., Anwar, S., 2013. Frequency and Temperature Dependence Dielectric Behavior of Barium Zirconate Titanate Nanocrystalline Powder Obtained by Mechanochemical Synthesis. *Journal of Material Science: Materials in Electronics*, 24(10), 4033-4042.
- Sato, K., Yasumura, Y., 1985. Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance. *Journal of Applied Physics*, 58(9), 3655-3657.
- Sattar, A.A., Rahman, S.A. 2003. Dielectric Properties of Rare Earth Substituted Cu-Zn ferrites. *Physica Status Solidi (a)*, 200, 415-422.
- Saxena, A.N., 1969. Forward Current-Voltage Characteristics of Schottky Barriers on *n*-Type Silicon. *Surface Science*, 13(1), 151-171.
- Schmitsdorf, R.F., Kampen, T.U., Mönch, W., 1995. Correlation Between Barrier Height and Interface Structure of Ag/Si (111) Schottky Diodes. *Surface Science*, 324(2-3), 249-256.
- Schottky, W., Strömer, R., Waibel, F., 1931. *Hochfrequenztechnik*, 37, 162-165.
- Schotty, W., 1938. Halbleitertheorie der Sperrschicht. *Naturwissenschaften*, 26(52), 843.
- Schroder, D.K., 1998. *Semiconductor Material and Device Characterization*, 2nd ed., John Wiley&Sons, 337-379, New York.
- Schwoerer, M., Wolf, H.C., 2008. *Organic Molecular Solids*. Wiley, 300p, New York.
- Shankar Naik, S., Rajagopal Reddy, V., 2010. Analysis of Current-Voltage-Temperature (I-V-T) and Capacitance-Voltage-Temperature (C-V-T) Characteristics of Ni/Au Schottky Contacts on *n*-type InP. *Superlattices and Microstructures*, 48(3), 330-342.
- Sharma, B.L., 1984. *Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. Plenum Press, 1-50, New York.

- Sharma, M., Tripathi, S.K., 2016. Frequency and Voltage Dependence of Admittance Characteristics of Al/Al₂O₃/PVA: *n*-ZnSe Schottky Barrier Diodes. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 41, 155-161.
- Shiwakoti, N., Bobby, A., Asokan, K., Antony, B., 2016. Temperature Dependent Dielectric Studies of Ni/*n*-GaP Schottky Diodes by Capacitance and Conductance Measurements, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 42(3), 378-382.
- Singh, A., 1985. Characterization of Interface States at Ni/*n*-CdF₂ Schottky Barrier Type Diodes and the Effect of CdF₂ Surface Preparation. *Solid State Electronics*, 28(3), 223-232.
- Song, Y.P., Van Meirhaeghe, R.L., Laflere, W.H., Cardon, F., 1986. On the Difference in Apparent Barrier Height as Obtained From Capacitance-Voltage and Current-Voltage Temperature Measurements on Al/*p*-InP Schottky Barriers. *Solid State Electronics*, 29(6), 633-638.
- Soylu, M. 2007. Au/*n*-InP ve Au/Pyronine-B/*n*-InP Schottky Yapıların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 106s, Erzurum.
- Soylu, M., Yakuphanoglu, F., 2010. Analysis of Barrier Height Inhomogeneity in Au/*n*-GaAs Schottky Barrier Diodes by Tung Model. *Journal of Alloys and Compounds*, 506(1), 418-422.
- Sullivan, J.P., Tung, R.T., Pinto, M.R., Graham, W.R., 1991. Electron Transport of Inhomogeneous Schottky Barriers: A Numerical Study. *Journal of Applied Physics*, 70(12), 7403-7424.
- Sutar, B.C., Choudhary, R.N.P., Das, P.R., 2014. Dielectric and Impedance Spectroscopy of Sr (Bi_{0.5}Nb_{0.5}) O₃ Ceramics. *Ceramics International*, 40(6), 7791-7798.
- Symth, C.P., 1955. *Dielectric Behavior and Structure*, McGraw-Hill, 52-61, 202-215, New York.
- Sze, S.M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices*. 2nd ed., John Wiley&Sons, 130p, New York.
- Sze, S.M., Ng Kwok, K., 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd ed., John Wiley&Sons, 735p, New Jersey.
- Sztkowski, J., Sieranski, K., 1992. Simple Interface-Layer Model for the Nonideal Characteristics of the Schottky-Barrier Diode. *Solid State Electronics*, 35(7), 1013-1015.

- Şafak Asar, Y., Asar, T., Altındal, Ş., Özçelik, S., 2015. Investigation of Dielectric Relaxation and *a.c.* Electrical Conductivity Using Impedance Spectroscopy Method in (AuZn)/TiO₂/p-GaAs (110) Schottky Barrier Diodes. Journal of Alloys and Compounds, 628, 442-449.
- Şahin, B., Çetin, H., Ayyıldız, E., 2005. The Effect of Series Resistance on Capacitance-Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes. Solid State Communications, 135(8), 490-495.
- Tanrıkulu, E.E., Yıldız, D.E., Günen, A., Altındal Ş., 2015. Frequency and Voltage Dependence of Electric and Dielectric Properties of Au/TiO₂/n-4H-SiC (Metal-Insulator-Semiconductor) Type Schottky Barrier Diodes. Physica Scripta, 90(9), 095801.
- Tareev, B., 1979. Physics of Dielectric Materials, Mir Publishers, 67-95, 140-156, Moscow.
- Taşcıoğlu, İ., 2012. Au/PVA: Zn/n-Si (MPS) Schottky Engel Diyodun Elektriksel Özelliklerinin Sıcaklık ve Radyasyona Bağlı İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi , 120s, Ankara.
- Tataroğlu, A., 2006. Electrical and Dielectrical Properties of MIS Schottky Diodes at Low Temperatures. Microelectronic Engineering, 83(11-12), 2551-2557.
- Tataroğlu, A., 2013. Comparative Study of the Electrical Properties of Au/n-Si (MS) and Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Schottky Diodes. Chinese Physics B, 22(6), 068402.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., 2008a. Analysis of Electrical Characteristics of Au/SiO₂/n-Si (MOS) Capacitors Using the High-Low Frequency Capacitance and Conductance Methods. Microelectronic Engineering, 85(11), 2256-2260.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., 2008b. Analysis of Interface States and Series Resistance of MIS Schottky Diodes Using the Current-Voltage (I-V) Characteristics. Microelectronic Engineering, 85(1), 233-237.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., 2008c. Study on the Frequency Dependence of Electrical and Dielectric Characteristics of Au/SnO₂/n-Si (MIS) Structures. Microelectronic Engineering, 85, 1866-1871.
- Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Bülbül, M.M., 2005. Temperature and Frequency Dependent Electrical and Dielectrical Properties of Al/SiO₂/p-Si (MOS) Structure. Microelectronic Engineering, 81(1), 140-149.
- Tataroğlu, B., Altındal, Ş., Tataroğlu, A., 2006. The *C-V-f* and *G/ω-V-f* Characteristics of Al/SiO₂/p-Si (MIS) Structures. Microelectronic Engineering, 83(10), 2021-2026.

- Tecimer, H., 2014. Au/(Zn-Polivinil Alkol/*n*-GaAs Yapıların Hazırlanması ve Akım-İletim Mekanizmalarının Geniş bir Sıcaklık Aralığında İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 88s, Ankara.
- Tecimer, H., Türüt, A., Uslu, H., Altındal, Ş., and Uslu, İ., 2013. Temperature Dependent Current-Transport Mechanism in Au/(Zn-doped)PVA/*n*-GaAs Schottky Barrier Diodes (SBDs). *Sensors and Actuators A: Physical*, 199, 194-201.
- Tecimer, H., Uslu, H., Alahmed, Z.A., Yakuphanoglu, F., Altındal, Ş., 2014. On the Frequency and Voltage Dependence of Admittance Characteristics of Al/PTCDA/*p*-Si (MPS) Type Schottky Barrier Diodes (SBDs). *Composites Part B: Engineering*, 57, 25-30.
- Terman, L.M., 1962. An Investigation of Surface States at a Silicon/Silicon Oxide Interface Employing Metal-Oxide-Silicon Diodes. *Solid State Electronics*, 5(5), 285-299.
- Tunç, T., Dökme, İ., Altındal, Ş., Uslu, İ., 2010. Negative Dielectric Constant and Electrical Conductivity of Au/*n*-Si (111) Schottky Barrier Diodes with PVA/Ni, Zn Interfacial Layer. *Journal of Applied Polymer Science*, 122(1), 265-272.
- Tunç, T., Altındal, Ş., Dökme, İ., Uslu, H., 2011a. Anomalous Peak in the Forward-Bias C-V Plot and Temperature-Dependent Behavior of Au/PVA (Ni, Zn-doped)/*n*-Si (111) Structures. *Journal of Electronic Materials*, 40(2), 157-164.
- Tunç, T., Uslu, H., Altındal, Ş., 2011b. Preparation and Dielectric Properties of Polyvinyl Alcohol (Co, Zn Acetate) Fiber/*n*-Si and Polyvinyl Alcohol (Ni, Zn Acetate) *n*-Si Schottky Diodes. *Fibers and Polymers*, 12, 886-892.
- Tung, R. T. 1991. Electron-Transport of Inhomogeneous Schottky Barriers. *Applied Physics Letters*, 58(24), 2821-2823.
- Tung, R.T., 1992. Electron Transport at Metal-Semiconductor Interfaces: General Theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509.
- Tung, R.T., Sullivan, J.P., Schrey, F., 1992. On the Inhomogeneity of Schottky Barriers. *Materials Science and Engineering B*, 14(3), 266-280.
- Turton, R., 2000. *The Physics of Solids*. Oxford University Press, 450p, USA.
- Türüt, A., 2012. Determination of Barrier Height Temperature Coefficient by Norde's Method in Ideal Co/*n*-GaAs Schottky Contacts. *Turkish Journal of Physics*, 36, 235.

- Türüt, A., Batı, B., Kökce, A., Sağlam, M., Yalçın, N., 1996. The Bias-Dependence Change of Barrier Height of Schottky Diodes Under Forward Bias by Including Series Resistance Effect. *Physica Scripta*, 53(1), 118.
- Türüt, A., Karabulut, A., Ejderha, K., Bıyıklı, N., 2015a. Capacitance Conductance Characteristics of Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs Structures with Very Thin Al₂O₃ Interfacial Layer. *Materials Research Express*, 2(4), 046301.
- Türüt, A., Karabulut, A., Ejderha, K., Bıyıklı, N., 2015b. Capacitance-Conductance-Current-Voltage Characteristics of Atomic Layer Deposited Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs MIS Structures. *Materials Science and Semiconductor Processing*, 39, 400-407.
- Tyagi, M.S., 1991. Introduction to Semiconductor Materials and Devices. John Wiley&Sons, 271-291, New York.
- Uluşan, A.B., Tataroğlu, A., Azizian-Kalandaragh, Y., Altındal, Ş., 2017. On the Conduction Mechanisms of Au/(Cu₂O-CuO PVA)/n-Si (MPS) Schottky Barrier Diodes (SBDs) Using Current-Voltage-Temperature (I-V-T) Characteristics. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 29(1), 159-170.
- Verrelli, E., Tsoukalas, D., Kouvatsos, D., 2008. Deposition and Electrical Characterization of Hafnium Oxide Films on Silicon. *Physica Status Solidi (c)*, 5, 3720-3723.
- Von Hippel, A.R., 1959. Dielectrics and Waves. John Wiley&Sons, 3-8, 63-122, 160-166, 228-234. New York.
- Vural, Ö., Şafak, Y., Altındal, Ş., Türüt, A., 2010. Current-Voltage Characteristics of Al/Rhodamine-101/n-GaAs Structures in the Wide Temperature Range. *Current Applied Physics*, 10(3), 761-765.
- Vural, Ö., Şafak, Y., Türüt, A., Altındal, Ş., 2012. Temperature Dependent Negative Capacitance Behavior of Al/rhodamine-101/n-GaAs Schottky Barrier Diodes and R_s Effects on the C-V and G/ω-V Characteristics. *Journal of Alloys and Compounds*, 513(5), 107-111.
- Wang, C.C., Huang, H.K., Wang, Y.H., Houn, M.P., Wu, C.L. and Chang, C.S., 2004. Fabrication of GaAs Schottky Diode by Liquid Phase Chemical Enhances Oxidation. *Solid State Electronics*, 48(9), 1683-1686.
- Wang, C.C., Liu, G.Z., He, M., Lu, H.B., 2008. Low Frequency Negative Capacitance in La_{0.8}Sr_{0.2}MnO₃/Nb-doped SrTiO₃ Heterojunction. *Applied Physics Letters*, 92, 052905.
- Werner, J.H., 1988. Schottky Barrier and pn-Junction I/V Plots-Small Signal Evaluation. *Applied Physics A*, 47(3), 291-300.

- Werner, J., Levi, A.F. J., Tung, R.T., Anzlowar, M., Pinto, M., 1988. Origin of the Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts. *Physical Review Letters*, 60, 53.
- Werner, J.H., Gütter, H.H., 1991. Barrier Inhomogeneities at Schottky Contacts. *Journal of Applied Physics*, 69(3), 1522-1534.
- Wert, C.A., Thomson, R.M., 1970. *Physics of Solid*, McGraw-Hill, 2nd ed., 410-421, 388-403, New York.
- Wittmer, M., Freeouf, J.L., 1994. Schottky Barriers and the Reactivity of the Interface. *Europhysics Letters*, 26(2), 135-140.
- Wu, X., Schmidt, M.T., Yang, E.S., 1989. Control of the Schottky Barrier Using an Ultrathin Interfacial Metal Layer. *Applied Physics Letters*, 54, 268.
- Wu, X., Yang, E.S., Evans, H.L., 1990. Negative Capacitance at Metal-Semiconductor Interface. *Journal of Applied Physics*, 68, 2845.
- Wu, X., Yang, E.S., 1989. Interface Capacitance in Metal Semiconductor Junctions. *Journal of Applied Physics*, 65, 3560.
- Yakuphanoglu, F., Şenkal, B. F., 2008. Electrical Characterization of the Polyaniline Including Boron/*p*-type Silicon Structure for Optical Sensor Applications. *Synthetic Metals* 158(21-24), 821-825.
- Ye, P.D., Yang, B., Ng, K.K., Bude, J., 2005. Gan Metal-Oxide-Semiconductor High-Electron-Mobility-Transistor with Atomic Layer Deposited Al₂O₃ as Gate Dielectric. *Applied Physics Letters*, 86, 063501.
- Yerişkin, S.A., Balbaş, M., Tataroğlu, A., 2016. Frequency and Voltage Dependence of Dielectric Properties, Complex Electric Modulus, and Electrical Conductivity in Au/7% Graphene Doped-PVA/*n*-Si (MPS) Structure. *Journal of Applied Polymer Science*, doi: 10.1002/App.43827.
- Yıldırım, M., 2010. Au/SiO₂/*n*-Si (MY) Yapıların Elektriksel Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 100s, Ankara.
- Yıldırım, M., 2012. Al/Bi₄Ti₃O₁₂/*p*-Si Schottky Bariyer Diyotların Sıcaklığa Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 133s, Ankara.
- Yıldırım, M., Eroğlu, A., Altındal, Ş., Durmuş, P., 2011. On the Profile of the Temperature and Voltage Dependence of Interface States and Resistivity in Au/*n*-Si Structure with 79Å Insulator Layer Thickness. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 13(1), 98-105.

- Yıldırım, M., Gökçen, M., 2014. A Comparative Study Regarding Effects of Interfacial ferroelectric $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ (BTO) Layer on Electrical Characteristics of Au/*n*-Si Structures, *Bulletin of Materials Science*, 37(2), 257-262.
- Yıldırım, N., Türüt, A., Türüt, V., 2010. The Theoretical and Experimental Study on Double-Gaussian Distribution in Homogeneous Barrier Height Schottky Contacts. *Microelectronic Engineering*, 87(11), 2225–2229.
- Yıldız, D.E., Altındal, Ş., 2008. On the Temperature Dependence of Series Resistance and Interface States in Al/SiO₂/*p*-Si (MIS) Schottky Diodes. *Microelectronic Engineering*, 85(2), 289-294.
- Yıldız, D.E., Altındal, Ş., Tekeli, Z., Özer, M., 2010. The Effects of Surface States and Series Resistance on the Performance of Au/SnO₂/*n*-Si and Al/SnO₂/*p*-Si (MIS) Schottky Barrier Diodes. *Material Science in Semiconductor Processing*, 13(1), 34-40.
- Yıldız, D.E., Yıldırım, M., Gökçen, M., 2014. Investigation on Dielectric Properties of Atomic Layer Deposited Al₂O₃ Dielectric Films. *Journal of Vacuum Science and Technology: Vacuum, Surfaces, and Films A*, 32(3), 031509.
- Yu, A.Y.C., Snow, E.H., 1968. Surface Effects on Metal-Silicon Contacts. *Journal of Applied Physics*, 39(7), 3008.
- Yu, K., Cheung, S., Sands, T., Jaklevic, J., Cheung, N., Haller, E., 1986. Schottky Barrier Degradation of the W/GaAs System After High Temperature Annealing. *Journal of Applied Physics*, 60(9), 3235-3242.
- Yücedağ, İ., 2007. Metal-Yalıtkan-Yarıiletken (MIS) Yapılarda Elektrik ve Dielektrik Özelliklerinin Sıcaklık ve Frekansa Bağlı İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 104s, Ankara.
- Yücedağ, İ., 2009. On the Anomalous Peak at Low and Moderate Frequency C-V Curves Al/SiO₂/*p*-Si Structure at the Forward Bias Region. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 3, 612-615.
- Yücedağ, İ., Kaya, A., Altındal, Ş., 2014. Frequency and Voltage-Dependent Electrical and Dielectrical Properties of Al/Co-doped PVA/*p*-Si Structures at Room Temperature. *Chinese Physics B*, 23(4), 047304.
- Yücedağ, İ., Kaya, A., Altındal, Ş., 2015. On the Anomalous Peak in the Forward Bias Capacitance and Dielectric Properties of the Al/Co-doped (PVC+TCNQ)/*p*-Si Structures as Function of Temperature. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics*, 10(2), 173-178.

- Yücedağ, İ., Kaya, A., Tecimer, H., Altındal, Ş., 2014. Temperature and Voltage Dependences of Dielectric Properties and *a.c.* Electrical Conductivity in Au/PVC+TCNQ/*p*-Si Structures. *Material Science in Semiconductor Processing*, 28, 37-42.
- Zeyrek, S., Altındal, Ş., Yüzer, H., Bülbül, H.H., 2006. Current Transport Mechanism in Al/Si₃N₄/*p*-Si (MIS) Schottky Barrier Diodes at Low Temperatures. *Applied Surface Science* 252(8), 2999-3010.
- Zhu, C.Y., Feng, L.F., Wang, C.D., Cong, H.X., Zhang, G.Y., Yang, Z.J., Chen, Z.Z., 2009. Negative Capacitance in Light Emitting Devices. *Solid State Electronics*, 53(3), 324-328.
- Ziel, A., 1968. *Solid State Physical Electronics*. 2nd. ed., Prentice-Hall Electrical Engineering Series, Prentice-Hall Inc., 625p, London.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Çiğdem Şükriye GÜÇLÜ
Doğum Yeri ve Yılı : Burdur, 1977
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : cigdem.s.guclu@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Burdur Cumhuriyet Lisesi, 1991-1994
Lisans : SDÜ, Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, 1995-1999
Yüksek Lisans : MAKÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü 2009-2012

Mesleki Deneyim

Burdur Değişim Dershanesi 2002-2008

Yayınlar

1. GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR, A.F., KÖKCE, A., ALTINDAL, Ş., 2016. Frequency and voltage-dependent dielectric properties and *ac* electrical conductivity of (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs with thin Al₂O₃ interfacial layer at room temperature. Acta Physica Polonica A 129, 325-330. doi: 10.12693/AphysPolA.129.325
2. GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR, A.F., ALTINDAL, Ş., 2016. Double exponential I-V characteristics and double Gaussian distribution of barrier heights in (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs (MIS)-type Schottky barrier diodes in wide temperature range. Applied Physics A 122, 1032. doi: 10.1007/s00339-016-0558-x

Sempozyum

- GÜÇLÜ, Ç.Ş., BAYHAN, Ü., ÖZDEMİR KART, S., Turkish Physical Society (TFD27) International Physics Congress 'Liquid Properties of Cu₃Pt Alloy: MD Simulation Technique' Poster Presentation, 14-17/09/2010, Istanbul-Turkey.
- BAYHAN, Ü., GÜÇLÜ, Ç.Ş., Turkish Physical Society (TFD28) International Physics Congress, 'Thermal and Mechanical Properties of Ordered Alloys: Cu₃Ag MD Study' Poster Presentation, 6-9/09/2011, Bodrum-Turkey.
- GÜÇLÜ, Ç.Ş., BAYHAN, Ü., ÖZDEMİR KART S., ADIM Physics Days II, Simulation of Cu-based on Alloys, Oral Presentation, 25-27/04/2012, Denizli/Turkey.
- BAYHAN, Ü., GÜÇLÜ, Ç.Ş., Turkish Physical Society (TFD29) International Physics Congress, 'Molecular Dynamics Study of Some Ordered Metals and Metal Alloys, Oral Presentation, 5-8/09/2012, Bodrum/Turkey.
- BAYHAN, Ü., GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR KART, S., 17. Liquid State National Symposium, 'Thermodynamic Properties of Cu₂₅X₇₅ (X= Ni, Pd, Pt) binary random alloys: MD Simulation Technique.', Oral Presentation, 13-14 December 2013, Istanbul University Balta Limanı Tesisleri, Istanbul/Turkey.
- GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR, A.F., ALTINDAL, Ş., 2nd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2015), 'Frequency and Voltage-Dependent Dielectric Properties and *ac* Electrical Conductivity of Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs at room temperature', Poster Presentation, 14-19 October 2015, Limak Limra Hotel / Kemer-Antalya-TURKEY
- GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR, A.F., ALTINDAL, Ş., 2nd International Nanoscience and Nanotechnology for Next Generation (NaNONG) 2015, 'Frequency Dependence of Dielectric Properties and *ac* Electrical Conductivity of Au/Ti/Al₂O₃/n-GaAs structures with Different Thicknesses Al₂O₃ interfacial layer', Poster Presentation, 29 – 31 October 2015, Antalya, Sherwood Club Kemer, TURKEY.
- GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR, A.F., ALTINDAL, Ş., 12th International Nanoscience and Nanotechnology conference (NanoTR-12), 'Double Exponential and Double Gaussian Distribution of Barrier Heights in (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs (MIS) Diodes (SBDs) in Wide Temperature Range', Poster Presentation, 3-5 June 2016, Elite Hotel Darica, Kocaeli-TURKEY.
- GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR, A.F., ALTINDAL, Ş., 3rd International Nanoscience and Nanotechnology for Next Generation (NaNONG) 2016, 'Temperature dependent dielectric properties of (Au/Ti)/Al₂O₃/n-GaAs (MIS) structure in wide voltage range of $\pm 6V$ ', Poster Presentation (Best Poster Presentation Award), Antalya, Sherwood Club Kemer-TURKEY, 20 – 32 October 2016.

- GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR, A.F., ALTINDAL, Ş., , 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN-2016), 'A compare study on dielectric properties and *ac* electrical conductivity of Au/Ti/Al₂O₃/*n*-GaAs (MIS) structure with different thicknesses Al₂O₃ layers as function of the frequency at room temperature', Oral Presentation, 19-24 October 2016, Limak- Limra Hotel-Kemer/Antalya-TURKEY.
- GÜÇLÜ, Ç.Ş., ÖZDEMİR, A.F., ALTINDAL, Ş., 'On the temperature and voltage dependent negative dielectric constant, electric modulus and *ac* electrical conductivity in the Au/Ti/Al₂O₃/*n*-GaAs (MIS) structures at 1MHz', Poster Presentation, 28-30 June 2017, Hotel Hollywood llyidza, Sarajevo-BOSNA.

